

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Ширшова Вера Юрьевна

**МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**
(на примере малых арктических островов
и Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии)

1.6.20 – Геоинформатика, картография

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук, доцент
Балдина Елена Александровна

Москва – 2024

Содержание

Список сокращений.....	4
Введение	5
Глава 1. Методы радиолокационной спутниковой интерферометрии (РСИ) в географических исследованиях. Обзор литературы	16
1.1 Современное состояние мировой радиолокационной группировки.....	16
1.2 Основные принципы обработки РСИ.....	19
1.3 Мировой опыт применения результатов РСИ в географических исследованиях	30
Выводы к главе 1	40
Глава 2. Исходные пространственные данные и программное обеспечение для интерферометрической обработки	42
2.1 Параметры радиолокационных данных и их роль в географических исследованиях	42
2.2 Обзор программного обеспечения, поддерживающего интерферометрическую обработку.....	53
2.3 Пространственная информация для обработки РСИ.....	61
2.4 Исходные данные для разработки методик	70
Выводы к главе 2	73
Глава 3. Методика применения мультивременного композита с когерентностью (МТС) для мониторинга и картографирования малых арктических островов (на примере о. Визе, Карское море)	75
3.1 Физико-географическая характеристика острова Визе и обоснование объекта исследования	75
3.2 Материалы для исследования и методы их обработки	84
3.3 МТС в мониторинге сезонных изменений на примере острова Визе.....	88
3.4 Летние МТС композиты для малых арктических островов.....	98
3.5 МТС в дешифрировании природно-территориальных комплексов острова Визе	103
3.6 Порядок реализации методики применения МТС для мониторинга и картографирования малых арктических островов	111
Выводы к главе 3	112

Глава 4. Методика учета природных условий и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии на примере Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии	114
4.1 Обоснование района исследования	114
4.2 Обзор предыдущего опыта исследования смещений поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии методом дифференциальной интерферометрии.....	118
4.3 Порядок обработки исходных данных и дополнительной информации ...	121
4.4 Расчет смещений земной поверхности и анализ полученных результатов	131
4.5 Порядок реализации методики учета физико-географических факторов и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии..	137
Выводы к главе 4	139
Заключение	141
Список литературы.....	144
Приложение 1. Мировая радиолокационная группировка на 07.02.2024	169
Приложение 2. Режимы обзора при съемке РСА.....	176
Приложение 3. Принципы интерпретации цветов на композите МТС	177
Приложение 4. Карта. Природно-территориальные комплексы острова Визе..	179
Приложение 5. Статистика значений по МТС природно-территориальных комплексов острова Визе.....	181
Приложение 6. Основные метеопараметры (по ст. Мильково), характеризующие состояние местности в моменты съемки.....	204

Список сокращений

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

КА – космический аппарат

МТС – мультивременной композит с когерентностью (от *англ.* МТС – Multi-Temporal Coherence)

РСА – радиолокатор с синтезированной апертурой

РСИ – радиолокационная спутниковая интерферометрия

РЛИ – радиолокационное изображение

ЦМР – цифровая модель рельефа

ЦММ – цифровая модель местности

ПДЦМ – параметры движения центра масс

Введение

Актуальность работы. Радиолокационная спутниковая интерферометрия – один из методов дистанционного зондирования Земли, позволяющий получить высокоточную информацию о рельефе местности. Методом дифференциальной интерферометрии рассчитываются изменения высоты земной поверхности. Результаты съемок обеспечивают создание цифровых моделей рельефа/местности (ЦМР/ЦММ) и цифровых карт смещений. Интерферометрическая обработка основана на совмещении минимум двух радиолокационных изображений, полученных при одинаковых технических условиях съемки в разное время (исключение тандемный режим съемки – получение одновременно пары изображений). Ввиду этого актуальным направлением в наши дни стало развитие мониторинговых методов для таких задач, как определение изменений земной поверхности (*Верба и др., 2019*). Помимо широко применяемых результатов интерферометрической обработки – ЦМР и карт смещений – создается мультитременной композит с когерентностью МТС (*от англ. The Multitemporal Coherence Composite*). Это геоизображение формируется из промежуточных результатов обработки радиолокационных данных: изображений амплитуды и когерентности. Интерферометрические методы до недавнего времени были реализованы только на данных с зарубежных космических аппаратов, однако, на сегодняшний день в Российской Федерации запущен первый гражданский спутник с радиолокатором с синтезированной апертурой «Кондор-ФКА» №1 и в ближайшее время данные станут доступны для широкого круга потребителей. На нём запланирован интерферометрический режим съемки и стоит множество задач в целях социально-экономического развития Российской Федерации (*Федеральная космическая программа, 2016*). Формирование методик применения интерферометрических информационных продуктов для географических исследований является актуальной и приоритетной научной задачей для картографов и геоинформатиков.

Применение радиолокационных данных особенно актуально для исследования и картографирования арктических островов малой площади (до 500 км²), на которых изменение климата в Арктике сказывается наиболее заметно, а также для районов активного вулканизма, где для мониторинга изменения высоты поверхности требуются надежные методики обработки интерферометрических данных.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и усовершенствовании методик применения радиолокационной спутниковой интерферометрии для изучения географических объектов на примере картографирования современного состояния поверхности малых арктических островов и мониторинга их сезонной динамики, а также выявления изменений высоты земной поверхности на территориях активного вулканизма с учетом природных условий и метеорологической обстановки.

Достижение сформулированной цели предусматривает выполнение следующих **задач исследования**:

– проанализировать тенденции развития мирового радиолокационного ДЗЗ: существующие и перспективные съемочные системы, возможности применения интерферометрических информационных продуктов в географических исследованиях;

– разработать методику применения информационных продуктов интерферометрической когерентности для мониторинга сезонных изменений земной поверхности и картографирования малых арктических островов на основе интерпретации цветов на МТС; апробировать ее на примере о. Визе: создать базу радиолокационных изображений, оптимизировать процесс их обработки, проанализировать влияние метеорологических параметров на результат;

– обосновать методический подход к выбору параметров интерферометрической пары для определения смещений земной поверхности на территориях активного вулканизма методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии на примере Узон-Гейзерной вулкано-

тектонической депрессии и доказать необходимость мониторинга метеорологических параметров (осадков, температуры и направления ветра) при интерферометрической обработке с целью выявления многолетних изменений.

Объектом исследования являются физико-географические условия и свойства местности, оказывающие влияние на результаты обработки радиолокационной интерферометрии. **Предметом** выступает метод радиолокационной спутниковой интерферометрии в применении для географических исследований и картографирования.

Фактический материал, личный вклад автора. В основе работы лежат исследования автора, проводимые с 2017 года на кафедрах картографии и геоинформатики Института Наук о Земле СПбГУ и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также практическая деятельность с 2019 года в Научном центре оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» в отделе целевого применения спутников ДЗЗ радиолокационного наблюдения. Основные исходные материалы в работе – радиолокационные данные, полученные со спутника Sentinel-1, и программные комплексы для обработки радиолокационных данных SNAP и для геоинформационного анализа QGIS. Используемые данные ДЗЗ и программные комплексы являются свободно распространяемыми, соответственно описываемые автором методы обработки и методики становятся доступными для широкого круга географов. Материалы диссертации использованы в проектах, поддержанных грантами РФФИ № 18-05-60221 и РНФ № 21-17-00216.

Методология и методика. В основе работы лежат научно-методические принципы картографии и геоинформатики, разработанные К.А. Салищевым, А.М. Берлянтон, Е.Г. Капраловым, В. С. Тикуновым, И.К. Лурье. Методологическая база исследования опирается на методы географического дешифрирования аэрокосмических снимков, разработанные Л.Е. Смирновым, Ю.Ф. Книжниковым, В.И. Кравцовой, И.А. Лабутиной,

методы радиолокационного зондирования и обработки радиолокационных данных, созданные В.С. Верба, Л.Б. Неронским, Г. Зибкером, Д. Массонетом, Я. Вудхаусом, Л.А. Школьным, Р.Ф. Ханссеном, А.И. Захаровым, Р. Бамлером, А. Фарретти, и методики их применения в географических исследованиях и картографировании, предложенные Е.А. Балдиной, Ю.И. Кантемировым, Т.Н. Чимитдоржиевым, К.А.Трошко, П.Г. Илюшиной (Михайлюковой) и др.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые на основе мультивременных композитов с когерентностью сформирована методика картографирования природно-территориальных комплексов малых арктических островов и мониторинга сезонных изменений поверхности.

2. Впервые исследована и обоснована необходимость выбора параметров радиолокационной съемки в зависимости от физико-географических условий местности, а также учета метеорологических параметров, что позволило усовершенствовать методический подход при обработке данных методом дифференциальной интерферометрии.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная методика применения МТС композитов для картографирования малых арктических островов, апробирована на территории о. Визе, в дополнение к ней также сформированы:

- система интерпретации цветов на МТС;
- дешифровочные признаки изменений состояния местности и их цветовая интерпретация по МТС;
- характеристики межсезонных МТС для природно-территориальных единиц о. Визе.

Составленная карта природно-территориальных комплексов о. Визе служит примером применения разработанной методики, что открывает перспективу для проведения работ по обновлению картографической информации на территории других арктических островов, а сами МТС дают

возможность для отслеживания многолетних изменений с учетом сезонных изменений поверхности.

Методический подход определения изменений высот земной поверхности в пределах Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии стал основой для формирования методики, разработанной в разных тестовых районах по данным Sentinel-1. Методика является универсальным инструментом при работе с интерферометрическими данными и внедрена при планировании интерферометрической съемки и последующей обработке радиолокационной информации с «Кондор-ФКА» №1 и перспективных отечественных спутниках.

Защищаемые положения:

1. Мультивременной композит с когерентностью является новым видом геоизображений и представляет собой как источник для картографирования, так и инструмент для мониторинга сезонных и кратковременных состояний земной поверхности.

2. Методика оценки учета природных условий при двухпроходной дифференциальной интерферометрии позволяет адаптировать и усовершенствовать классический подход при выборе данных и порядке их обработки для природных территорий.

3. Учет метеорологических показателей и параметров съемки является при интерферометрической обработке радиолокационных изображений гарантией получения достоверных результатов мониторинга.

Степень достоверности. Экспертное дешифрирование снимков высокого разрешения в видимом диапазоне подтверждает достоверность выделения природно-территориальных единиц о. Визе с применением МТС композитов. Надежность методики учета физико-географических условий при определении изменения высоты земной поверхности методом дифференциальной интерферометрии в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии подтверждается стабильностью получаемых результатов при разных конфигурациях радиолокационной съемки спутника

Sentinel-1 за несколько лет. Выявленные незначительные изменения высоты земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии, не противоречат предшествующим геофизическим обследованиям (Кугаенко, Салтыков, 2009; Kiryukhin, 2016; Чебров и др., 2019), что подтверждает достоверность результатов обработки.

Апробация работы. Результаты исследования и основные положения диссертации представлены автором на открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2020, 2022); международной конференции *European Polar Science Week* (Дания, 2020); международном арктическом саммите ASSW 2021 (Португалия, 2020); XXXII Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред», (Санкт-Петербург, 2021); *FRINGE 2021* (Нидерланды, 2021); X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», (Москва, 2021); научной конференции «Ломоносовские чтения-2021» (Москва, 2021); на всероссийской конференции с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» (Калининград, 2022); IX Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2022); IV Всероссийской научно-практической конференции «GeCa» (Санкт-Петербург, 2019, 2022); XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» MARESEDU-2022 (Москва, 2022); XIV Международной научно-практической конференции «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. Навигация» (Москва, 2023); VII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (Хабаровск, 2023); XI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем ДЗЗ» (Москва, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 4 рецензируемых изданиях (журналах) из списка Scopus, WoS и RSCI, 8 статей в сборниках и материалах всероссийских и международных конференций и 8 тезисов докладов. Во всех работах вклад автора является определяющим. Постановка научных задач обработка и интерпретация полученных данных, подготовка и предоставление их в печать проводились непосредственно соискателем. При подготовке текста диссертации использован текст публикаций, в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования. Личный вклад автора является определяющим, им подготовлен текст работы, графически материалы, проведено представление рукописи в редакцию и работа с рецензентами (Ширшова, Балдина, 2021; Ширшова и др.2023).

Публикации в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.20:

1. **Ширшова В.Ю., Балдина Е.А., Лебедева Е.В.** Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — №4. — С. 133-146. — DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146 (SJR:0.308).

2. Балдина Е.А., **Ширшова В.Ю., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю.** Динамика береговой линии и состояния поверхности малых арктических островов (Визе и Ушакова) по разновременным оптическим и радиолокационным снимкам // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2022. — №1. — С. 107–122 (5 SJR:0.197).

3. **Ширшова В.Ю., Балдина Е.А.** Применение мультитременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — №4. — С. 79-91. — DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-79-91 (SJР:0.308).

4. **Ширшова В.Ю.** Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2019. — №4. — С. 399-408. — DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-4-000-000 (импакт-фактор РИНЦ: 0.282).

Публикации в материалах конференций:

5. **Ширшова В.Ю.** Методика анализа физико-географических параметров территории для планирования интерферометрической съемки // Материалы XI Междунар. науч.-тех. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем ДЗЗ» — М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2023. — С. 157.

6. **Ширшова В.Ю.** Мультивременные композиты с когерентностью в дешифрировании природно-территориальных комплексов острова Визе // Сборник конференции ИТНРС-2023 — Изд-во ФИЦ ДВО РАН, 2023 — С. 95-99.

7. **Ширшова В.Ю.** Физико-географическая характеристика территории как основной фактор выбора параметров интерферометрической пары // Материалы IX междунар. науч. конф. — Изд-во Сиб. федер. ун-т, Красноярск, 2022. — С. 81-83.

8. *Аниканова М.А., Бадак Л.А., Захаров А.И., Костюк Е.А., Орлова Н.В., Тараканов Ю.А., Ширшова В.Ю.* Технические решения по реализации технологии планирования интерферометрической съемки КС радиолокационного наблюдения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XX Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2022. — С. XX.559.

9. **Ширшова В.Ю., Балдина Е.А.** Опыт определения смещений земной поверхности в районе Узон-Гейзерной депрессии и вулкана Кихпиньч

(Камчатка) по данным радиолокационной спутниковой интерферометрии Sentinel-1 с разными параметрами съемки данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XX Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2022. — С. XX.G.311.

10. *Пижанкова Е.И., Балдина Е.А., Гаврилов А.В., **Ширшова В.Ю.*** Дистанционные данные в исследовании природных процессов малых островов Карского моря данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XX Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2022. — С. XX.G.201.

11. *Пижанкова Е.И., Балдина Е.А., Гаврилов А.В., Кучейко А.А., **Ширшова В.Ю.**, Ширяев М.А.* Экзогенная геодинамика малых островов арктических морей (по результатам дешифрирования космических снимков) // Сборник докладов VI конф. геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» — М.: КДУ «Добросвет», 2022 — С. 484-491.

12. *Балдина Е.А., **Ширшова В.Ю.**, Романенко Ф.А.* Оптические и радиолокационные снимки для изучения динамики береговой линии малых арктических островов // сб. матер. XXIX Всерос. береговой конф. с междунар. участием — Изд-во БФУ им. И. Канта Калининград, 2022. — С. 299-301.

13. ***Ширшова В.Ю.*** Разработка методики построения ЦМР по радиолокационным данным Sentinel-1 методом дифференциальной спутниковой интерферометрии в условиях Арктики на примере острова Визе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XVIII Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2021. — С. 106.

14. ***Ширшова В.Ю.**, Балдина Е.А.* Применение многовременных композитов с когерентностью для характеристики сезонной изменчивости поверхности арктического острова Визе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XVIII Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2021. — С. 107.

15. **Ширшова В.Ю.** Применение интерферометрической когерентности для изучения поверхности арктического острова Визе // Ломоносов-2021: Материалы межд. молодеж. науч. форума. — М.: МАКС Пресс, 2021.

16. **Ширшова В.Ю., Балдина Е.А.** Опыт картографирования о. Визе (Карское море) по радиолокационным интерферометрическим данным // Сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование» — Изд-во «Политехника» Санкт-Петербург 2021 — С. 380-384.

17. **Балдина Е.А., Жданова Е.Ю., Луговой Н.Н., Романенко Ф.А., Ширшова В.Ю.** Исследование сезонной и многолетней динамики малых арктических островов Визе и Ушакова по оптическим и радиолокационным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XVIII Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2021. — С. 301.

18. **Бадак Л.А., Захаров А.И., Костюк Е.А., Ширшова В.Ю.** Методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки с целью формирования цифровой модели рельефа земной поверхности // Сборник трудов X Всероссийской науч.-тех. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» — М.: АО «Российские космические системы», 2021. — С. 139-147.

19. **Балдина Е.А., Ширшова В.Ю.** Изображения когерентности для характеристики сезонной изменчивости поверхности арктического острова Визе // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) — Т. 1. — Издательство ПГНИУ Пермь, 2020 — С. 13-16.

20. **Ширшова В.Ю.** Мониторинг оседаний земной поверхности в урбанизированных районах с помощью спутниковой радиолокационной интерферометрии (на примере г. Санкт-Петербург) // Сборник III Всерос. науч.-практ. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование» — Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена СПб, 2019, — С. 60-65.

Структура и объем работы. Помимо Введения и Заключения, диссертационная работа состоит из четырех глав, включающих 44 рисунка и 9 таблиц. Объем диссертации составляет 209 страниц, основной текст изложен на 168 страницах. В работе содержится 6 приложений. Список литературы содержит 307 наименований (в том числе 205 – на иностранном языке).

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в процессе исследования своему научному руководителю *к.г.н. Е.А. Балдиной*, всему коллективу кафедры картографии и геоинформатики и коллективу лаборатории аэрокосмических методов в особенности, *д.г.н. В.И. Кравцовой*, заведующему лабораторией *к.г.н. М.В. Зимину* и *к.г.н. П.Г. Илюшиной*, заведующей кафедрой *д.г.н. И.К. Лурье*; за ценные консультации *к.г.н. Ф.А. Романенко*, *к.г.-м.н. Е.И. Пижанковой*, *к.г.н. Е.В. Лебедевой*, *к.г.н. Е.Ю. Ждановой*, *к.т.н. Е.А. Костюку*, а также всему коллективу отдела целевого применения радиолокационных космических систем и руководству Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» за поддержку и помощь в участии в конференциях, посвящённых ДЗЗ. Также особо признателен *М.А. Ширяеву*, студенту кафедры картографии и геоинформатики за картографический и аналитический вклад в создание карты ПТК о. Визе, *В.А. Халманову*, заместителю директора ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» за предоставление архивных материалов, *к.б.н. М.В. Гаврило* (заместитель директора национального парка Русская Арктика по научной работе «ААНИИ») за фотографии о. Визе.

Глава 1. Методы радиолокационной спутниковой интерферометрии (РСИ) в географических исследованиях. Обзор литературы

1.1 Современное состояние мировой радиолокационной группировки

Космический радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА или SAR от *англ.* Synthetic Aperture Radar) успешно используется для систематического и непрерывного мониторинга поверхности Земли: геосферы, биосферы, гидросферы и криосферы – в научных, гражданских, коммерческих и военных целях. Это связано с тем, что с помощью РСА можно получать изображения с высоким разрешением для решения широкого круга тематических задач независимо от солнечного освещения и погодных условий. Радиолокационная спутниковая интерферометрия, помощью которой по разности фаз РЛИ на одну территорию строятся высотные модели – метод, набравший свою популярность и получивший колоссальное развитие в последнее десятилетие благодаря эффективности применения, как в решении военных разведывательных задач, так и в географических исследованиях (*Hanssen, 2001; Massonnet, Souyris, 2008; Richards et al., 2010*). Интерферометрия в общем понимании – это высокоточный метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с определением высоты земной поверхности, основанный на использовании эффекта интерференции электромагнитных волн, открытого на рубеже XIX века. Интерферометрический метод получил большое развитие благодаря своей точности, которая составляет доли длины волны, излучаемой антенной. Современные КА оснащены радиолокаторами, осуществляющими зондирование в сантиметровом диапазоне длин волн, что дает основание рассчитывать на миллиметровую точность получаемых результатов.

С середины 1940-х гг. началась эпоха применения методов радиолокационного дистанционного зондирования. Это произошло во многом благодаря американским ученым М. Райлу и С. Ванбергу, впоследствии удостоенных нобелевских премий в области радиофизики (*Thompson et al., 2017*). Огромный вклад в развитие интерферометрических

методов внесли выполненные на рубеже 1950-х – 1960-х гг. исследования Луны и ближайших планет Солнечной системы: Марса (*Goldstein, Gillmore, 1963*), Меркурия (*Carpenter, Goldstein, 1963*), Юпитера (*Goldstein, 1964*) и Венеры (*Котельников и др., 1965*), в том числе – для изучения рельефа путем создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) (*Goldstein, 1974; Котельников и др., 1980; Campbell, 2002*).

Развитие технологий РСА в 1960-х и реализации с их помощью интерферометрической съемки одним аппаратом (далее об этом будет сказано подробнее) дало новый виток в применении интерферометрических данных – в исследованиях земной поверхности. Так один из первых экспериментов по картографированию рельефа местности по данным радиолокационной интерферометрической съемки был проведен Л. Грэхэмом в начале 1970-х гг. (*Graham, 1974*).

Теоретические вопросы радиолокационной интерферометрии активно изучали одновременно специалисты в СССР и в США, стараясь перегнать друг друга, но все материалы исследований долгое время были засекречены. Главными трудами в области радиолокации в нашей стране, освещающими весь комплекс радиолокационной съемки, являются монографии под руководством В.С. Вербы. В них охарактеризована аппаратура и изложена теория радиолокационного ДЗЗ от типов космических аппаратов и антенн до принципов формирования радиолокационных изображений (РЛИ) и их обработки (*Верба и др., 2010; Верба и др., 2019*). Детальное рассмотрение принципов формирования РЛИ, оценка качества и подходы к дешифрированию РЛИ отражены в работах (*Zebker, Villasenor, 1992; Woodhouse, 2005; Школьный и др., 2008; Richards, 2009; Захаров и др., 2012*). Огромный вклад в развитие интерферометрии внесли (*Hanssen, 2001; Ferretti, 2014*), заложившие общий подход к работе с фазовой информацией и перспективные направления развития методов определения смещений поверхности.

Обзор современного состояния и путей развития радиолокационных космических систем

В настоящий момент на орбитах находятся 148 спутников с РСА (на 21.02.2023), что четко следует обозначенной тенденции, намеченной 10 лет назад – наступил «золотой век» космической радиолокации (*Moreira et. al., 2013*). По состоянию на начало 2022 года работало 66 КА. Темпы развития группировок странами-лидерами космической отрасли набирают серьезные обороты, и, как показывает таблица (Приложение 1), главным лидером является Китай. Однако, не все КА ведут съемку в интерферометрическом режиме, а некоторые заявленные аппараты не имеют подтверждений, как в случае с Capella – отсутствуют научные публикации по практическому применению данных.

Быстрый рост в космической индустрии связан с уменьшением размеров и массы космических аппаратов с РСА для радиолокационной съемки. До сих пор космические РСА размещались на борту монолитных спутников, масса которых составляет несколько тонн. Затем стали разрабатываться и запускаться малые и средние спутники, вес которых менее 500 кг. Этот тренд базируется на стратегии «Быстрее, лучше и дешевле» (FBC), которую NASA начала внедрять с 1992 года (*McCurdy, 2001*). Быстрое развитие новых космических систем достигается также за счет использования гибких подходов и новейших коммерческих технологий. Внедрение концепций «Меньше» и «Легче», особенно в области малых спутников, позволяет ускорить разработку и внедрение инновационных программ, связанных с «Новой космической парадигмой» (*от англ. NSP – New Space Paradigm*). Группировка малых спутников с РСА обладает рядом преимуществ, и может дополнить или заменить существующие миссии средних и крупных спутников с радиолокационной съемкой, таких как Sentinel-1, TerraSAR-X и KOMPSAT-5 (*Ince, 2020*).

Таким образом, в последние 5 лет прослеживается устойчивая тенденция к увеличению числа КА ДЗЗ в группировках разных стран. Так, в

2022 году состоялось около 23 запусков, а в 2023 году – ещё 11. Среди запусков стоит отметить запуск первых отечественных гражданских радиолокационных КА «Кондор-ФКА №1» (запущен 27 мая 2023 года) и запланированный «Обзор-Р» (запуск запланирован в последнем квартале 2023 года). По количеству запущенных РСА лидирующее положение занимает Китай, за ним США и Финляндия. Особое внимание обращает на себя один из самых востребованных режимов радиолокационной съемки – интерферометрический. Исходя из собранной информации, на сегодняшний день его поддерживают большие (массогабаритные) КА, отмеченная же возможность малых КА на практике (по анализу научных публикаций) не подтверждается.

1.2 Основные принципы обработки РСИ

Принцип радиолокационной спутниковой интерферометрии основан на разности фаз эхо-сигналов от одного и того же участка земной поверхности, зарегистрированных РСА с двух близких точек в пространстве. Радиолокационная съемка относится к активному типу зондирования: радиолокатор посылает импульс в направлении земной поверхности, затем этот импульс частично ею поглощается, а частично отражается в сторону РСА. Отраженный сигнал поступает на приемник и далее в виде голограммы передается на записывающее устройство. Голограмма должна пройти специальную обработку для получения комплексного радиолокационного изображения. Комплексное РЛИ относится к 1 уровню обработки и содержит в себе значение амплитуды и фазы сигнала. В процессе стандартной обработки получают амплитудные РЛИ, а на основе фазовой составляющей формируют интерферометрические продукты обработки (*Верба и др., 2010; Коберниченко, Сосновский, 2013*).

Интерферометрическая съемка может осуществляться одним или двумя аппаратами, выполняющими съемку с близких и почти параллельных орбит спутника – двухпроходная интерферометрия или одним двухантенным аппаратом, проводящим измерения в одном сеансе – однопроходная

интерферометрия (рис.1.1). Интервал между съемками в двухпроходном режиме называется *временной базовой линией*. Получаемая разность фаз содержит в себе информацию о рельефе и смещениях земной поверхности, произошедших за интервал между съемками. Возможность разделения этих эффектов предоставляют методы дифференциальной интерферометрии, которые позволяют измерять смещения зондируемой поверхности. Впервые возможности дифференциальной интерферометрии были продемонстрированы в конце 1980-х годов (*Gabriel, Goldstein, 1988; Gabriel et al., 1989*) при мониторинге оседаний сельскохозяйственных полей. Дифференциальная интерферометрия служит устойчивым методом исследований по оценке последствий землетрясений (*Pollitz, 1996; Волкова, Хайретдинов, 2022; Тимофеева, 2022*) и просадок в местах добычи нефти и газа (*Fielding et al., 1998; Захаров, Хренов, 2004; Кузьмин, 2020*).

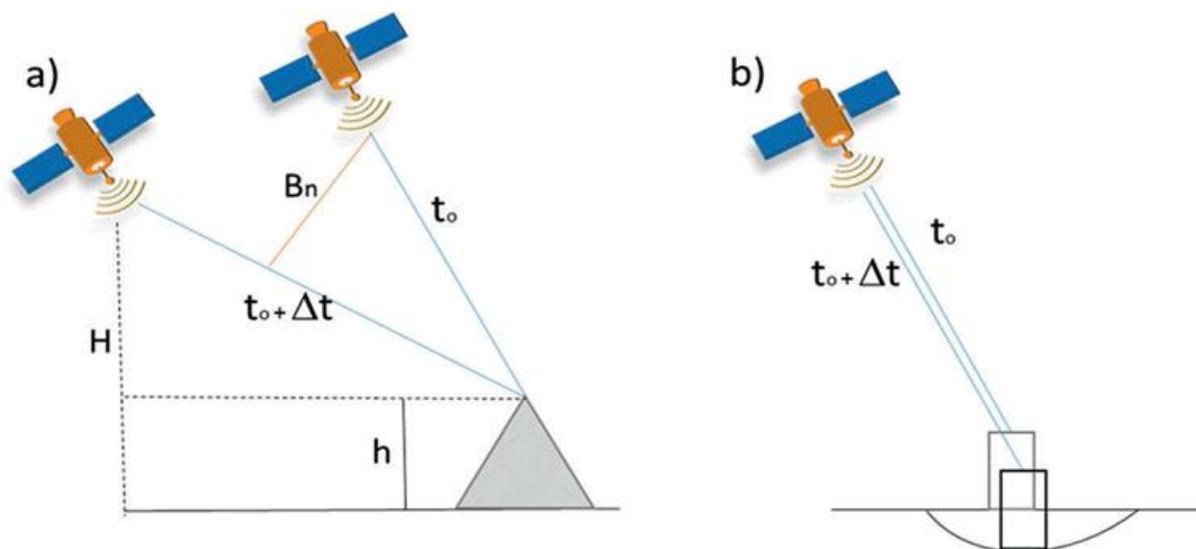


Рисунок 1.1. Принцип двухпроходной РСИ, где t_0 относится к первому времени съемки, Δt – ко второму (интервал между 1-ой и 2-ой съемками образует временную базовую линию), ориентация двух точек в пространстве влияет на величину пространственной базовой линии (B_n) и соответственно на конечные результаты обработки а) для формирования ЦМР (H — высота КА, h — высота цели); б) для обнаружения смещений земной поверхности (*Vassileva et al., 2017*)

Технология проведения интерферометрической съемки зависит от ориентации двух точек съемки в пространстве, расстояние между которыми называется *пространственной базой интерферометра* (см. рис. 1.1 а). Выделяют два вида интерферометрической съемки: с ориентацией базы вдоль трассы полёта – продольная интерферометрия (рис. 1.2, слева), и

поперёк трассы – поперечная интерферометрия (рис. 1.2, справа). Продольная интерферометрия может быть организована только в однопроходных режимах съемки и предназначена для использования в военно-разведывательных интересах: определения движущихся целей – измерения их скорости (Петров и др., 2021); и в интересах океанологии – наблюдения за океаническими течениями (Alpers et al., 1981; Goldstein et al., 1989; Shemer, Kit 1991). Области применения поперечной интерферометрии куда шире благодаря меньшей требовательности к ее технологической реализации. К решаемым географическим задачам относятся: построение цифровых моделей рельефа, измерение смещений зондируемой поверхности, когерентный мониторинг.

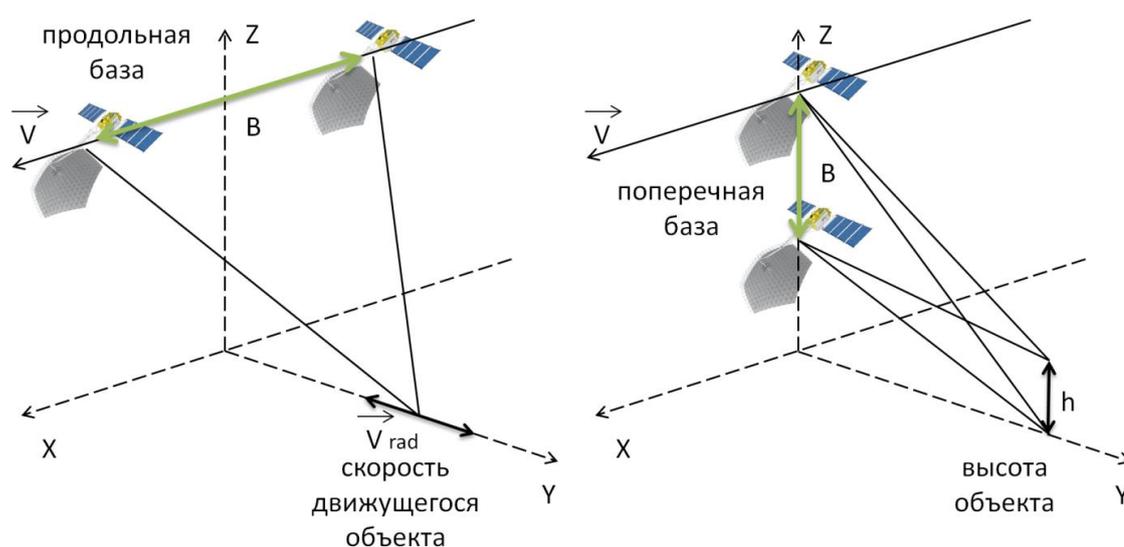


Рисунок 1.2. Орбитальное построение КА при интерферометрической съемке: слева – продольная интерферометрия; справа – поперечная интерферометрия (B – пространственная база)

Поперечная однопроходная интерферометрия является наилучшей для построения ЦМР. Так, например, была создана цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) на основе использования интерферометрической съемки радиолокатором с жесткой пространственной базой: космическим аппаратом с РСА и вынесенной на зафиксированное расстояние приемной антенной. Съемка была произведена за 11 дней в феврале 2000 года двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR. Полученная ЦМР покрывает большую часть территории Земли, исключая

северные широты выше 60° и южные выше 54° (CGIAR, URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/>). Подобным образом в 2007 году выполнена программа TerraSAR-X/TanDEM-X, благодаря которой вслед за SRTM создана общедоступная ЦМР – WorldDEM с разрешением 90 м, охватывающая всю поверхность суши и обеспечивающая относительную вертикальную точность 2 м и абсолютную точность 4 м (EOC DLR, URL: <https://geoservice.dlr.de/>). Время сбора данных по этой программе составило больше времени – около трех лет. По этой программе работали два спутника, совершивших тандемный полет на меняющемся расстоянии в несколько сотен метров друг от друга. Данные TerraSAR-X были доступны также и для заказа съемки. Еще большую детальность обеспечили программы RADARSAT-2 и COSMO-SkyMed-1, реализованные возможности съемки с пространственным разрешением до 1 м.

В случаях использования двухпроходной съемки для построения ЦМР стараются минимизировать временную базовую линию – *период замыкания орбит* – для уменьшения влияния погодных явлений, приводящих к изменениям отражательных свойств поверхности, а именно к снижению когерентности отраженных сигналов. Для оценки смещений и других изменений на местности необходима именно двухпроходная интерферометрия с временной базой, варьирующейся в зависимости от конкретной географической задачи. Так, для оценки дрейфа льда она составляет 1–3 суток (Виноградов и др., 2018), для определения медленных оседаний грунта – месяцы и годы (Lanari et al., 2007), для определения изменения растительности – недели (Балдина, 2005).

Интерферометрическая обработка пары РЛИ проводится в несколько этапов, на которых формируются информационные продукты (рис. 1.3). Информационные продукты можно подразделить на промежуточные и конечные. Обработка до промежуточных продуктов во всех интерферометрических методах единообразна, до конечных – отличается

разным действием при пересчете полученной фазы в вертикальное смещение или высоту рельефа.

Интерферометрическая обработка проводится при наличии пары РЛИ с одинаковыми параметрами съемки, одно РЛИ выступает опорным, а другое – вспомогательным. Выделяют 7 этапов обработки (*Franceschetti, Lanari, 1999; Елизаветин и др., 2003; Ferretti et al., 2007; Коберниченко, Сосновский, 2010; Захаров, и др., 2012*) (рис.1.3):

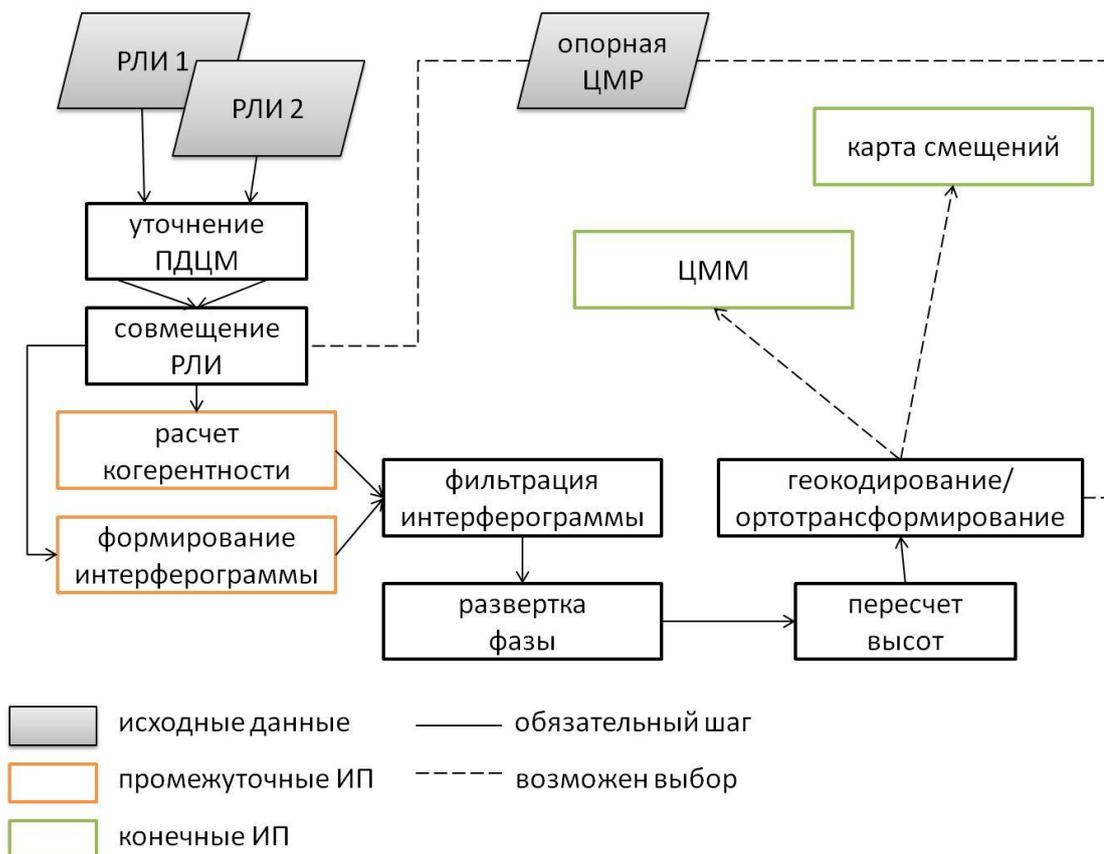


Рисунок 1.3. Этапы интерферометрической обработки пары РЛИ

Уточнение параметров движения центра масс (ПДЦМ). Векторы состояния орбиты, представленные в метаданных РСА-продукта, как правило, не точны и могут быть улучшены с помощью точных орбитальных файлов, которые доступны через несколько дней (неделю) после создания продукта.

Орбитальный файл содержит точную информацию о положении и скорости спутника. На основе этой информации обновляются векторы состояния орбиты в абстрактных метаданных продукта. Уточнение ПДЦМ,

или как чаще используемый в программных реализациях термин, – уточнение орбит – этап, необходимый для абсолютизации точности привязки РЛИ на субпиксельном уровне. Существует 3 вида ПДЦМ: расчетные, бортовые и номинальные. Расчетные данные получаются на этапе планирования интерферометрической съемки и, как правило, никогда не фигурируют в обработке. Бортовые ПДЦМ получаются благодаря тому, что на борту космического аппарата находится бортовое измерительное устройство, которое принимает и обрабатывает сигналы от навигационных спутников, выдает результаты одномоментных навигационных определений (Яковлев, 2013). В этих измерениях чаще всего формируются РЛИ. Номинальные расчеты для любого космического аппарата могут быть получены спустя 10 суток после съемки (Курошев, 2011; Егوشкин и др. 2019). Такие данные публикуются в открытых каталогах, как в случае Sentinel-1, или РЛИ поставляются уже с уточненными параметрами орбит, тогда этот этап обработки может быть пропущен.

Если по техническим причинам уточнить параметры орбиты не удастся, то можно продолжать обработку с бортовыми ПДЦМ, однако это все же повлияет на точность конечного информационного продукта.

Совмещение РЛИ. Этап совмещения изображений или их корегистрация представляет собой попиксельное совмещение РЛИ и является основополагающим для последующей обработки, поскольку он гарантирует, что каждый элемент земной поверхности вносит свой вклад в один и тот же пиксель (дальность, азимут) как в опорное изображение, так и во вспомогательное (Wang et al., 2014). Возможно выполнение, как в автоматическом режиме, так и с применением контрольных точек, вводимых оператором. Зависит от функционала программного обеспечения.

Расчет изображений когерентности и формирование интерферограммы. Когерентность, или лучше ее абсолютное значение (поскольку это комплексная величина), представляет собой меру сходства

двух изображений, определяющую степень согласованности двух РЛИ (Rodriguez, Martin, 1992; Prati, Rocca, 1992; Захаров А.И., 2012).

Пиксели радиолокационного изображения являются реализацией случайных природных и антропогенных процессов, следовательно, их значения будут сильно колебаться даже в наиболее благоприятных условиях: при нулевых временной и пространственной базовых линиях. Надо учитывать, что фазовый шум на интерферограмме изменяется от пикселя к пикселю из-за различного воздействия случайных факторов, наложенного на случайные амплитуды пикселей, следовательно, пиксели со слабым отражением будут показывать более рассеянные интерферометрические фазы. Чаще всего это заметно на природных объектах, которые покрыты растительностью, легко поддающейся движению ветра. В то же время как сильные и стабильные рассеиватели, такие как антропогенные объекты, дают более надежные фазы. Мера изменения γ – когерентность двух РЛИ (называемая также комплексным коэффициентом корреляции) вычисляется:

$$\gamma = \frac{\langle u_M u_S^* \rangle}{\sqrt{\langle |u_M|^2 \rangle} \sqrt{\langle |u_S|^2 \rangle}} = \frac{\langle v \rangle}{I}, \quad (1-1)$$

где u_M и u_S РЛИ опорного и вспомогательного сигналов, v – амплитуда интерферограммы, а I – мощность сигнала (1-1).

В числителе выражения находится усредненная амплитуда интерферограммы, а в знаменателе – усредненные мощности двух РЛИ, формирующих интерферограмму. Таким образом, интерферограмма является своего рода комплексным выражением когерентности (Touzi et al., 1999; Захаров и др., 2012; Чимитдоржиев и др., 2020).

Когерентность принимает значения от 0 до 1, и по ней следует делать выводы о стабильности интерферометрической фазы. На значение когерентности влияет множество физико-географических параметров, воздействие которых рассмотрено в главе 2.

Генерация интерферограммы требует вычисления попиксельного сопряженного произведения двух корегистрированных изображений:

$$V_i = u_M u_S^* \quad (1-2)$$

Приведенная формула (1-2) действительна при условии, что интерферограмма получена по РЛИ с одинаковыми параметрами съемки.

Комплексное некогерентное накопление. Интерферограмму, полученную на предыдущем этапе, принято называть «сырой интерферограммой», поскольку ее фаза довольно зашумлена, по крайней мере, в случае приема повторных проходов, на которые сильно влияет временная декорреляция. Из этого следует необходимость уменьшения шума путем усреднения соседних пикселей в комплексной интерферограмме. Чтобы уменьшить шум, в качестве постобработки выполняется некогерентное накопление. Часто этот шаг применяют для перехода к пикселю квадратной формы и закругления пространственного разрешения. Например, для РСА Sentinel-1 коэффициенты будут 5:1 (азимут: наклонная дальность), что приводит к закруглению пространственного разрешения по азимуту в 5 раз.

Такое усреднение весьма эффективно по отношению к любому некоррелированному шуму, обусловленному временными, базовыми, объемными и т.д. источниками. Однако оно не способно удалять артефакты, коррелированные с пространством, например, из-за атмосферной турбулентности, ошибок при выравнивании и т.д.

Фильтрация интерферограммы. Фазовый шум, присутствующий на РЛИ, состоит из нескольких компонентов: шумы аппаратуры РСА, канала распространения радиоволн, системы обработки и пространственно-временной декорреляции снимков. Наличие фазового шума приводит к ухудшению разрешения по высоте, что ведет к ошибкам в конечных информационных продуктах.

Методов подавления фазового шума достаточно много, наиболее широко используемые – алгоритмы простого усреднения с адаптивным подбором размера окна (Boxcar), адаптивный пространственный фильтр

(Adaptive window), алгоритм Гольдштейна фильтрации в частотной области (Goldstein filter) (Goldstein, Werner, 1998; Lee et al., 1998; Mora et al., 2003).

Алгоритм Гольдштейна получил самое большое распространение, во многом благодаря своей реализации в открытом программном продукте SNAP (Li et al., 2008). Метод основан на поиске точек и областей интерферограммы, где нарушается условие потенциальности градиента фазы, и на исключении их из процесса интегрирования. Точки, в которых ротор градиента отличен от нуля, называют фазовыми вычетами или фазовыми остатками: они могут быть положительными и отрицательными. Пара из близлежащих отрицательного и положительного вычетов соединяется ветвью. Совокупность ветвей образует дерево. Далее различными методами оптимизации строится дерево наименьших размеров, после чего производится интегрирование изображения градиента фазы, причем пути интегрирования должны обрываться в местах пересечения с ветвями (Baran et al., 2003).

Стоит отметить, что идеальные условия для формирования интерферограммы на практике встречаются довольно редко. К дополнительным способам минимизации фазового шума следует отнести его удаление путем маскирования по пороговому значению когерентности. Некогерентными зонами чаще всего являются обширные площади, занятые растительным покровом, водные объекты и территории, подвергшиеся изменениям в интервал съемки.

Развертка фазы. Интерферограмма – это набор основных значений разности фаз (измеряемых в единицах 2π радиан), представленный в виде матрицы. Чтобы получить информацию о рельефе из этой интерферограммы, необходимо преобразовать ее в матрицу абсолютных значений разности фаз. Процесс восстановления массива абсолютных фазовых значений из массива основных значений фаз называется задачей развертки фазы. Высота неоднозначности h_a является важным параметром, определяющим перепад высоты, при котором фаза в интерферограмме изменяется на величину 2π .

Определяется h_a как разность высот местности, которая создает интерферометрическое изменение фазы на 2π и обратно пропорциональна перпендикулярной базовой линии:

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_n}, \quad (1-3)$$

где λ – длина волны, θ – угол визирования, R – расстояние до цели, B_n – пространственная база.

Целью развертки фазы является восстановление целого числа циклов n , которые необходимо добавить к исходной фазе φ , чтобы в конечном счете можно было получить однозначное значение фазы ψ для каждого пикселя изображения:

$$\psi = \varphi + 2\pi \cdot n \quad (1-4)$$

Переход от фазы к высоте поверхности или ее изменению. После развертки фазы можно локализовать каждый пиксель изображения относительно декартовой системы отсчета: от координат радара (наклонная дальность, азимут, изменение фазы) происходит переход к описанию местной топографии. С этой целью проводилось на первом этапе уточнение орбитальных данных для каждого РЛИ. После локализации точки легко вычислить высоту относительно опорного эллипсоида и, преобразовать координаты в любую требуемую систему отсчета (*Richards, 2007*).

Отсутствие точных (номинальных) ПДЦМ может быть компенсировано наличием наземных контрольных точек в известных координатах, хотя их идентификация является этапом обработки, зависящим от человека. На сегодняшний день точность орбит ДЗЗ не позволяет проводить генерацию ЦМР без какой-либо точки привязки, и все методы преобразования фазы в высоту требуют, по крайней мере, одной наземной контрольной точки.

Комплексная интерферограмма – интерферометрическая фаза $\Delta\varphi$ – содержит вклады как высоты, так и смещения (*прим.* и других, о которых более подробно будет изложено во 2 главе):

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{топо}} + \varphi_{\text{diff}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (1-5)$$

Смещения согласно формуле вычисляются так (Ferretti et al., 2007):

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi_d \quad (1-6)$$

где d – относительное смещение зондируемого объекта, спроецированное на направление наклонной дальности. Поэтому такие смещения носят названия LOS от *англ.* line-of-sight – смещения по линии видимости радара или по линии визирования (рис. 1.4) (Ferretti et al., 2007; Верба и др., 2010).

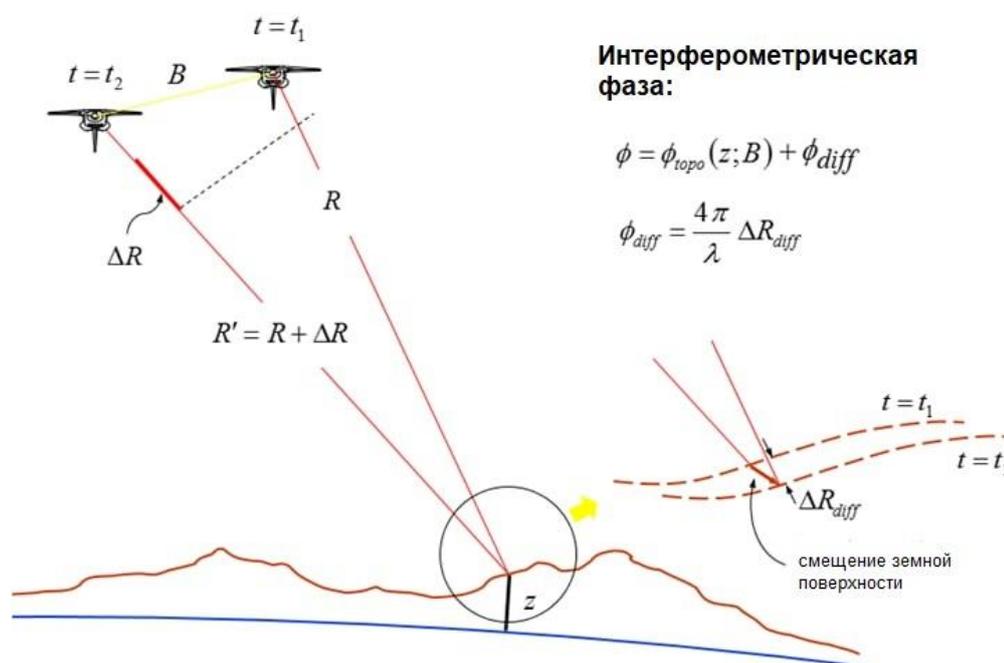


Рисунок 1.4. Принцип определения смещения земной поверхности методом дифференциальной интерферометрии (R – расстояние от цели z до приемника, B – перпендикулярная базовая линия, t – время съемки, ϕ – фаза)

За счет опорной ЦМР из интерферометрической фазы – $\Delta\varphi$ вычитается топографическая составляющая фазы – $\varphi_{\text{топо}}$, в результате в идеале в фазе остается только информация о смещении земной поверхности (Richards, 2007).

Опираясь на формулу (1-5), при планировании съемки под формирование ЦМР необходима минимизация вклада, обусловленного смещениями земной поверхности, которые могли произойти в интервал времени, что достигается при условии одновременного получения двух изображений – при тандемной съемке.

Геокодирование. Матрицу абсолютных или относительных высот, полученных на этапе пересчета фазовых значений в высоту или смещения, следует трансформировать в географическую систему координат (*Schwabisch, 1998; Hanssen, 2001; Eineder, 2003*).

Предполагается, что помимо двух комплексных РЛИ также имеется ЦМР на зондированную область (см. рис. 1.3). Подробно роль ЦМР в интерферометрической обработке рассмотрена во 2 главе. В случаях, когда опорная ЦМР недоступна, итоговую интерферограмму можно просто скомпенсировать по эллипсоиду Земли.

1.3 Мировой опыт применения результатов РСИ в географических исследованиях

Результатами РСИ принято считать интерферометрические информационные продукты, которые в свою очередь следует разделить на конечные, промежуточные и композитные продукты. К конечным продуктам относятся цифровые карты рельефа и смещений. Промежуточными информационными продуктами являются интерферограмма и карта когерентности, которые, помимо оценки качества возможных информационных продуктов самостоятельно участвуют в решении разного рода географических задач. Композитные продукты могут быть получены при комбинировании в 3 каналах раstra (красном, синем и зеленом) других информационных продуктов. Так, например, когерентно совмещённые РЛИ – это совмещение 3 когерентностей, амплитудно-когерентного детектирования изменений – различные комбинации амплитуды и когерентности. Научно-практический потенциал таких продуктов на сегодняшний день еще изучен не в полном объеме.

Конечные информационные продукты

Цифровые модели рельефа. Построение ЦМР методом радиолокационной спутниковой интерферометрии – одно из самых изученных и востребованных направлений использования интерферометрических РСА. Самыми известными и используемыми в

географических исследованиях являются глобальные цифровые модели рельефа SRTM и WorldDEM, количество публикаций с их упоминаниями исчисляются десятками тысяч. Радиолокационные съемки, собравшие материалы для создания этих глобальных ЦМР, были произведены SRTM в 90-е годы, WorldDEM – через 20 лет после, однако релизы новых версий моделей с улучшенными точностями выходят до сих пор. Это отмечает тренд в развитии методов именно обработки данных, в то время как метод получения ЦМР по РЛИ хорошо изучен.

В зависимости от частотного диапазона мы получаем все-таки цифровую модель местности (ЦММ) и для вычленения рельефа в чистом виде (без растительного покрова и/или застройки) необходимы алгоритмы фильтрации, которые также активно развиваются (*Zhu et al., 2014; Letsios et al., 2019; De Macedo et al., 2021*). Наиболее подходящими по диапазону для построения ЦМР являются данные в L-диапазоне. Однако, SRTM, широко используемая в географических исследованиях, была получена по данным в С-диапазоне, а позже созданная глобальная ЦМР по данным TanDEM-X – уже в X-диапазоне.

В настоящее время работы в области создания ЦМР/ЦММ направлены на совершенствование инструментов обработки данных с целью повышения качества формируемого продукта. ЦМР, полученные по РЛИ, часто содержат спекл-шум, который может значительно снизить качество геоморфометрического анализа (*Yang et al., 2011*). Существуют алгоритмы, которые фильтруют трехмерные объекты от шума, сохраняя при этом особенности рельефа и микрорельефа (*Jacobsen, 2005*). Так в исследовании Дж. Стивенсона приводится алгоритм, который очищает трехмерные объекты от шума, сохраняя при этом значимые черты рельефа (*Stevenson et al., 2010*). Уровень шумоподавления контролируется двумя параметрами: порогом, определяющим точность сохраняемых признаков, и количеством итераций, определяющим степень изменения данных. Оптимальные настройки зависят от характера топографии и удаляемого шума. По

сравнению с данными, отфильтрованными до эквивалентного уровня с помощью среднего фильтра – алгоритмом шумоподавления Х. Суна (*Sun et al., 2007*), предложенный алгоритм Дж. Стивенсона ближе к исходным данным и соответственно к истине. Метод нашел широкое применение не только в геоморфологических исследованиях, но и в других прикладных и научных областях с применением ЦМР (*Sampson et al., 2015; Sang, 2013; Schlögel et al., 2018*).

Карты смещений. Метод дифференциальной интерферометрии широко применяется для создания крупномасштабных карт смещений земной поверхности с высоким разрешением миллиметрового порядка. Смещения земной поверхности могут быть вызваны различными явлениями, как естественными природными процессами: вулканической активностью, сейсмическими событиями, оползнями, движением ледников, так и антропогенной деятельностью: просадка земли в местах разработки месторождений и многое другое (*Goldstein, Werner, 1998; Lanari et al., 2010; Velez et al., 2011; Cigna et al., 2012; Lundgren et al., 2020*). Вслед за формированием ЦМР – активно развивающимся направлением является мониторинг смещений, образуя различные ответвления от метода классической дифференциальной интерферометрии (Differential interferometry – DInSAR) (*Raspini et al., 2022*). На сегодняшний день существует несколько методов интерферометрической обработки, к ним можно отнести и классическую DInSAR, и серийные методы: SBAS (Small Baseline Subset – метод малых базовых линий) (*Lanari et al., 2007; Casu et al., 2014*), и PSI (Persistent Scatterers Interferometry, интерферометрия постоянных рассеивателей) (*Gernhardt, Bamler, 2012; Notti D. et al., 2014*), IPTA (Interferometric Point Target Analysis, интерферометрический анализ точечных целей) (*Stramondo et al., 2008; Zhao et al., 2018; Shahzad et al., 2020*).

Усовершенствованный подход DInSAR, именуемый Small Baseline Subset (SBAS) (*Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004*), дает возможность получения высокоточных смещений, а также анализа временных и

пространственных закономерностей деформаций, как на обширных территориях, так и в локализованных точках.

Одним из подходов к наблюдению за динамикой деформаций на отдаленных труднодоступных территориях является генерация временных рядов смещений. Количество пар, применимых для дифференциальной интерферометрии, тесно связано с длиной волны сигнала радара с синтезированной апертурой. Так, РСА с более низкими частотами позволяют обеспечить большее число критических перпендикулярных базовых линий, чем РСА с более высокими частотами, которые дают увеличение количества интерферометрических пар, пригодных для дифференциальной интерферометрии (*Sandwell et al., 2008*).

Стоит отметить опыт Европейского Космического Агентства (ЕКА) по мультисенсорной обработке РЛИ, полученных с КА ERS-1/2 и ENVISAT, собранных различными РСА, однако со схожей геометрией съемки, что позволило получить очень длинные временные ряды деформаций земной поверхности (1992–2010 гг.) (*Bonano et al., 2012*).

Мультисенсорный и многомасштабный подход SBAS-DInSAR был успешно применен для анализа деформационных явлений, вызванных несколькими природными и/или антропогенными процессами, такими как смещения, связанные с вулканической активностью (*Borgia et al., 2005; Schaefer et al., 2019; Fan et al., 2021*), сейсмические явления (*Lanari, 2010; Нугманов, Чернова, 2015*), оседания и оползни (*Guzzetti et al., 2009; Lanari et al., 2007; Энтин и др., 2022*), смещения зданий и инфраструктурных объектов (*Bonano et al., 2012; Arangio et al., 2014; Solari et al., 2018; Talledo et al., 2022*). Так в работах (*Bonano et al., 2013; Manunta et al., 2019; Gagliardi et al., 2023*) отмечена точность около 5 мм при одном измерении и около 2 мм/год на среднюю скорость деформации, полученные результаты SBAS применяются для геофизического моделирования (*Fernandez et al., 2009; Dai et al., 2022*).

Однако SBaS в большей степени зарекомендовал себя как метод оценки площадных деформаций, в настоящее время ведутся разработки по его объединению с методом PSI (*Pawluszek-Filipiak, Borkowski, 2020; Morishita et al., 2020*).

Исследования, связанные с изменением морфометрических показателей рельефа, привлекающие метод PSI, помогают уточнить границу оседания, которую затем можно использовать для того, чтобы помочь исследователям изучить закон оседания, вызванного, например, повторными разработками карьера в этой области (*Liu et al., 2014; Milczarek et al., 2017; Alam et al., 2022*). Метод успешно зарекомендовал себя также при решении задач техногенного мониторинга (*Мельников и др., 2015; Cigna, Tapete, 2021*), однако есть серьезные сезонные и климатические ограничения, такие как снежный покров, вплоть до невозможности формирования информационных продуктов. Возможность определения высоты снежного покрова методами дифференциальной интерферометрии, в свою очередь является актуальным научно практическим направлением: пока существуют попытки ее реализации в L-диапазоне длин волн (*Дагуров и др., 2017; Киселева и др., 2017*).

Несмотря на огромный потенциал высокоточных методов определения смещений, классическая дифференциальная интерферометрия, основанная на получении смещений по одной паре РЛИ, также имеет спрос и успешное применение в решении географических задач на природных территориях. В первую очередь это обуславливается возможностью определения смещений по одной лишь паре РЛИ. В то время как для метода постоянных рассеивателей PSI необходимо не менее 30 РЛИ, для метода малых базовых линий SBAS – 3, то для классической дифференциальной двухпроходной интерферометрии DInSAR всего 2. В качестве существенного недостатка метода DInSAR можно отметить высокую ответственность исследователя при анализе полученных результатов, т.к. нет способов устранения атмосферного и ионосферного влияния (*Ширшова и др., 2023*). Классический

метод может быть применен и в случае быстро погодно переменчивых территорий, где нет возможности набрать серию в 30 РЛИ в год с одинаковыми условиями, как в случае с высокоширотными территориями.

Промежуточные информационные продукты¹

Изображения когерентности. Применение изображений интерферометрической когерентности уже уверенно зарекомендовало себя как надежный метод для анализа изменчивости поверхности. Последнее время все больше публикаций посвящено именно самой когерентности, и чаще всего эти работы выполнены с целью оценить изменения ландшафтов или их разнообразие. Немалое количество исследований сфокусировано на применении когерентности для анализа растительного покрова (*Srivastava et al., 2006; Engdahl, Нуурппа, 2003; Amarsaikhan et al., 2007; Vicente-Guijalba et al., 2018; Ma et al., 2018; Khalil, Haque, 2018; Wang et al., 2018*). В основном эти публикации демонстрируют возможность совместного применения интерферометрической когерентности и оптических данных при классификации типов поверхности с использованием различных методов машинного обучения (*Bartsch et al., 2020; Jiang et al., 2017; Yun et al., 2019*).

Стоит выделить многолетний труд европейских учёных, выполненный в рамках проекта «ESA SEOM SInCohMap», по анализу возможностей применения разновременных изображений когерентности по данным Sentinel-1 (*Vicente-Guijalba et al., 2018*). Ими были выбраны несколько тестовых полигонов в Испании, Италии и Польше для разнообразных типов земной поверхности: территория без растительности, сельскохозяйственные земли и городские застройки, высокогорные ландшафты. В этом исследовании также проанализирована эффективность различных комбинаций данных в разной поляризации и интенсивности сигнала при

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Ширишова В.Ю., Балдина Е.А. Применение мультитременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — №4. — С. 79-91.

обработке методами и алгоритмами классификации. Общий потенциал интерферометрической когерентности Sentinel-1 для картографирования земного покрова был оценен как очень хороший. Во всех случаях результаты классификации, основанные на изображениях когерентности, обеспечивали более высокую точность, чем методики, основанные на интенсивности обратного сигнала (яркости) – амплитудных РЛИ, с учетом 12-дневного временного интервала Sentinel-1. Однако, на арктических территориях метод не опробовался.

В российской практике можно выделить несколько значимых направлений по этому вопросу: исследования самой когерентности (ее свойств) и разработка методов определения географических характеристик объектов.

Среди работ по применению интерферометрической когерентности – самостоятельно или в сочетании с амплитудными свойствами РЛИ наибольший прогресс получили направления: картографирования сельскохозяйственных районов и вулканических территорий (*Виноградова, Сосновский, 2018; Достовалов, Трошко, 2020; Чимитдоржиев и др., 2020; Михайлюкова и др., 2020*). Применение когерентности в исследованиях арктического региона проводится в основном для изучения инфраструктуры и мониторинга, ввиду отсутствия оптической или мультиспектральной информации. Изучение арктических островов или территорий Арктики с привлечением радиолокационной информации ведётся в основном для построения ЦМР и определения подвижек, а также изучения свойств морских льдов (*Sharov, 2012*).

Еще одним тематическим направлением применения когерентности является сегментация лесных/нелесных территорий по ее значениям, например, для определения территорий, охваченных лесными пожарами. Кроме того, могут быть обнаружены области замерзания и оттаивания грунта в районах вечной мерзлоты, а лиственные леса могут быть отделены от хвойных (*Wagner et al., 2000*).

С применением изображений когерентности, построенных с интервалом в 12 дней по данным Sentinel-1 и климатической модели, проведен мониторинг последствий землетрясения в городе Сарполе-Захаб (Иран) проведён. В результате была разработана методика оценки площади и объема разрушений (*Karimzadeh et al., 2018*).

Одним из актуальных направлений анализа изображений когерентности можно отметить их применение совместно с метеорологическими данными, как сопоставление значений когерентности, давления, температур и осадков (*Baldina et al., 2020*).

Интерферограмма. Хотя интерферограмма представляет собой именно тот продукт, на основе которого получают смещения и ЦМР, применение ее самой для оценки смещений продолжается и сейчас (*Chang et al., 2004; Hu et al., 2016*). Анализ дифференциальных интерферограмм применяется для оценки стабильности ледяных шапок, которым угрожают наблюдаемые в арктическом регионе изменения климата. При потеплении ледяные поверхности быстро теряют свою целостность, часто в течение нескольких дней. Кроме того, текучий лед может очень быстро создать градиент смещения, превышающий интерферометрические возможности (*Samsonov, 2019*). Тандемная миссия дала большие объемы точных результатов на ледяных шапках, вызвав революцию в этой области, благодаря данным ERS (*Wangensteen, 2005*).

Среди открытых вопросов – проблема определения линии плавучести шельфового ледника, показывающей до какой точки под ледником, существует жидкая вода. Интерферометрия может помочь ответить на этот вопрос, обнаружив изгиб ледника во время прилива. На рисунке 1.5 показаны арктические ледники в Гренландии, где этот вопрос был изучен и решен (*Rignot, 1998*).

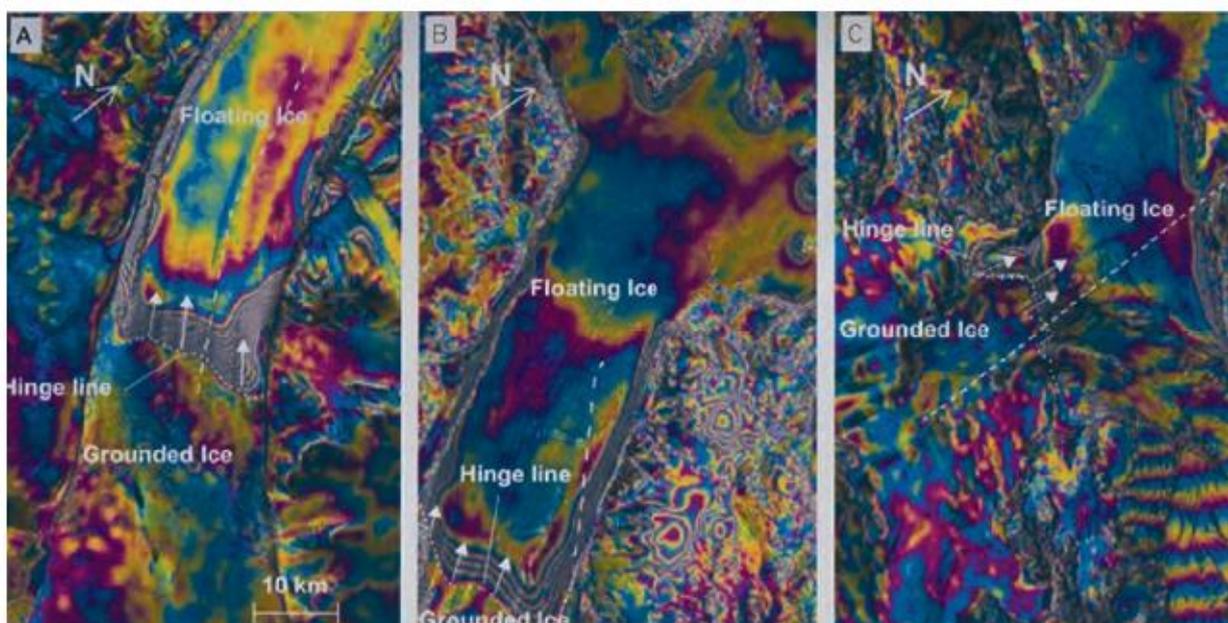


Рисунок 1.5. Тандемная интерферометрия: движение льдов (Rignot, 1998)

Комбинированные информационные продукты

Композиты с амплитудой и когерентностью. Совместное использование амплитуды обратного рассеяния и когерентности обеспечивает лучшую сегментацию изображения. В то время как полученная амплитуда зависит от электромагнитной структуры цели, когерентность в основном связана с ее механической стабильностью. Такие комбинации получили свое применение главным образом при оценке состояния сельскохозяйственных районов. На верхнем ярусе растительности уровень когерентности примерно линейно связан с биомассой (Moeremans, Dautrebande, 1999; Кантемиров, 2013; Sinha, 2015). Формирование синтезированных изображений с когерентностью, например, наиболее известный мультитременной композит с когерентностью (от англ. MTC – Multi-Temporal Coherence), для которого была произведена интерпретация цветов для территорий сельскохозяйственного назначения (Пиетранера и др., 2012) (рис. 1.6).

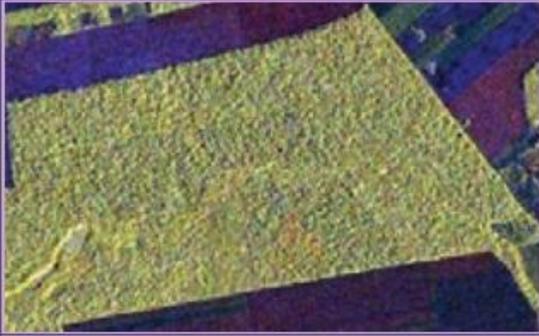
Относительная выраженность каналов RGB-композиата	Итоговый цвет на композите МТС	Визуализация на композите МТС	Тип объекта
 <p>Сильная амплитуда обоих снимков, низкая когерентность</p>	Желтый		<p>Растительность, незначительно выросшая за период между съемками, т.е. естественная природная растительность.</p> <p>В случае наличия текстуры (рисунок слева) это лес.</p>
 <p>Сильная амплитуда обоих снимков, высокая когерентность</p>	Белый		<p>Крупные здания и сооружения, объекты, имеющие углы, объекты из бетона и металла, столбы, опоры ЛЭП, железные дороги.</p> <p>Наиболее интенсивный белый цвет в случае, если вышеперечисленные объекты ориентированы параллельно азимуту радарной съемки (т.е. перпендикулярно направлению дальности)</p>

Рисунок 1.6. Фрагмент таблицы интерпретация цветов на композите МТС (Пиетранера и др., 2012)

Также проводились исследования по применимости метода МТС по данным Sentinel-1 для обнаружения и оконтуривания гарей в рамках валидации картографической службы *Copernicus Emergency Management Service* (EMS). Были изучены эффекты поляризации, режима съемки и угла визирования. Результаты оконтуривания на основе Sentinel-1 сравнивались с результатами, полученными при использовании оптических изображений. Результаты сравнения показали возможность использования метода МТС для оконтуривания гарей, поскольку наблюдались высокие корреляции (*Donezar et al., 2019*).

Метод МТС применим для тематического анализа и картографирования состояния территории. Возможен анализ многовременных изменений на основе набора данных. Отличительной чертой такого подхода является формирование композитов с определенным

временным интервалом, что как раз и обеспечивает выявление произошедших изменений. Мультивременные композиты с когерентностью просты по своему формированию в силу того, что они не требовательны к постоянству погодных условий, пространственной базовой линии. По ним, возможно, дешифровать не только сезонные изменения местности, но и картографировать, на основе выявленных изменений, природно-территориальные комплексы. Методика применения МТС для исследования арктического региона представлена в 3 глава.

Выводы к главе 1

Комплексный анализ вопросов радиолокационной интерферометрии: характеристик космических аппаратов, этапов обработки данных, информационных продуктов и мировой практики применения получаемой информации позволяет сделать следующие выводы.

1. За последние два года обозначен резкий тренд в расширении мировой радиолокационной группировки. Большинство космических аппаратов поддерживают интерферометрический режим съемки, в различных вариациях основных характеристик: диапазон длин волн, пространственное разрешение и периодичность. Что требует определения областей целевого применения получаемой информации – географических задач, которые космические системы будут решать. Большое число исследований в области дифференциальной интерферометрии, а также стремительный рост числа спутников, работающих в интерферометрическом режиме, в том числе отечественного «Кондор-ФКА» №1, подтверждают целесообразность разработки методик применения интерферометрического метода.

2. В процессе интерферометрической обработки формируются конечные и промежуточные информационные продукты. В географических исследованиях, как правило, применяются конечные информационные продукты в целях получения информации о характере рельефа и его изменений. Так, за несколько десятилетий применения интерферометрии получены значительные достижения: сформированы глобальные ЦМР

(SRTM, WorldDEM) и разработаны высокоточные методы выявления смещений (SBaS, PSI). Однако, все чаще встречаются работы по применению промежуточного продукта интерферометрической обработки – изображения когерентности. Его применяют в различных географических задачах: для анализа растительного покрова и классификации ландшафтов.

3. Метод МТС, основанный на использовании изображений когерентности и амплитуды обратного рассеяния, применяется для тематического анализа и картографирования состояния сельскохозяйственных территории и ранее не применялся для арктических. Преимуществом метода является анализ изменений местности на основе набора многовременных радиолокационных изображений. Отличительной чертой такого подхода является формирование композитов с определенным временным интервалом, анализ которых обеспечивает выявление произошедших изменений.

Глава 2. Исходные пространственные данные и программное обеспечение для интерферометрической обработки

2.1 Параметры радиолокационных данных и их роль в географических исследованиях²

Используемая исследователями радиолокационная информация, а именно продукты стандартной и высокоуровневой обработки в виде изображения обладают значительным спектром вариации своих характеристик. Сложилась определенная практика выбора данных с учетом этих свойств. Личный опыт работы автора с радиолокационной информацией и обзор научных публикаций дает основание заключить: практически во всех работах исследователи используют имеющиеся на тот момент (доступные) данные. Тем не менее, обзор практического применения позволяет сделать вывод о влиянии параметров данных на успешность решения разных задач в науках о Земле.

Диапазон длин волн. Характер взаимодействия электромагнитной волны с зондируемой поверхностью в первую очередь зависит от длины волны (1-25 см). Этим параметром определяется размер неровностей поверхности, отвечающих за формирование отражения, глубина проникновения волны и степень ее поглощения. В географических исследованиях предпочтительная частота зондирующего сигнала зависит от решаемой задачи. Рассмотрим диапазоны длин волн, используемые в наиболее распространенных областях применения радиолокационных данных (*Earth Observing ...*, 1988; *Захаров*, 2013; *Костров*, *Толстов*, 2017; *Tsokas et al.*, 2022).

X (2.5-3.75 см) и C (3.75-7.5 см) диапазоны предпочтительны для задач классификации морских льдов или ландшафтов. В случае с морским льдом это объясняется соответствием линейного размера волны размерам

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Бадак Л.А., Захаров А.И., Костюк Е.А., Ширинова В.Ю. Методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки с целью формирования цифровой модели рельефа земной поверхности // Сборник трудов X Всероссийской науч.-тех. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» — М.: АО «Российские космические системы», 2021. — С. 139-147.

неоднородностей неровностей верхних слоев ледового покрова: зерен, кристаллов и других (*Захваткина и др., 2009; Fischer et al., 2020*). Различные типы ландшафтов отличаются по степени шероховатости, что также обуславливает выбор этих диапазонов (*Dobson et al., 1995*). Исходя из приведенного обзора мировой группировки, X-диапазон является самым широко представленным в различных по массе космических аппаратах разных стран (см. Приложение 1). Также при выполнении мониторинга смещений инфраструктурных объектов в северных регионах предпочтение отдают именно этим диапазонам длин волн (*Кривенко, Кашиников, 2009; Энтин и др., 2022*). Перспективная отечественная группировка Обзор-Р также будет осуществлять съемку в X-диапазоне.

S-диапазон (7.5–15 см) на сегодняшний день обладает наименьшей практической изученностью ввиду многих причин. Стоит отметить, что этот диапазон не использовался долгое время для зондирования из космоса, будучи применяемым больше в радиосвязи. Наибольший опыт использования S-диапазона был накоплен при первых РЛ съёмках с КА Алмаз в 1991-92 гг., где велось зондирование под крутыми углами на малых дальностях, когда потенциал РСА выше. В ходе эксплуатации было проведено множество уникальных экспериментов по зондированию морской поверхности, наблюдению морских течений, поверхностных проявлений внутренних волн и, даже по интерферометрии на территорию Антарктиды (*Захаров, Тугаринов, 1998*). Отмечается, что реализация интерферометрических режимов на более длинных волнах технически проще за счет стабильности частоты и высокой когерентности (*Костров, Толстов, 2017*).

L-диапазон (15-30 см), являясь более длинноволновым, имеет повышенную проникающую способность и находит применение при исследовании пресноводных бассейнов, когда возможно отражение от дна промерзшего насквозь водоема. При определении влажности почв, также предпочтительно использование более длинноволнового диапазона, который позволяет снизить влияние слабовыраженной шероховатости поверхности и подчеркнуть составляющую отражения, характеризующую диэлектрические свойства. Так, и для определения границ водных объектов применяется L-

диапазон, т.к. снижается чувствительность к ветровой ряби на поверхности (Lanari et al., 1996; Yu et al., 2011; Arai H. et al., 2022). Однако стоит отметить, что наиболее успешные программы, по данным которых были созданы глобальные ЦМР, проводили съемку в X-диапазоне, но в тандемном режиме, главным преимуществом которого является отсутствие временной декорреляции. Так, были созданы уже упомянутые ранее SRTM и WorldDEM (DLR, URL <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90>).

Изучение же растительных покровов требует использования разных диапазонов длин волн вследствие широкого спектра размеров характерных структур, представляющих собой отражающий слой (Pierdicca et al., 2011; Spies et al., 2017).

Таким образом, можно заключить, что S-диапазон (который является рабочим для отечественных РСА, установленным на КА Кондор-ФКА) обладает преимуществами длинноволновых диапазонов – особо актуально при выделении границы растительного покрова и дорог (Бабочкин и др., 2016). В то же время есть теоретические наработки возможностей производить оценку удельных объемов биомассы (Ningthoujam et al., 2017).

Пространственное разрешение. Существует множество географических задач с различными требованиями по разрешению. Очевидно, что величина предельного разрешения определяется размерами исследуемого объекта и задачей, решаемой при исследовании конкретного объекта. Так для задач оборонного значения: разведки, слежения, обнаружения движущихся целей, также как и для задач мониторинга: районов чрезвычайных ситуаций и подвижек земной поверхности необходимы данные высокого разрешения до 5 метров (Костров и др., 2019; Бабочкин и др., 2022). Тематические задачи, связанные с картографированием ландшафтов, лесных территорий, сельскохозяйственных земель, снежного покрова решаются с применением среднего пространственного разрешения до 50 метров (Shi et al., 1994). Задачи, связанные с судоходством во льдах, могут использовать данные с пространственным разрешением от 100–300 метров, так как для них главное – охват зондируемой площади (Wang et al., 2016; Калинов, Родионов, 2016).

Управление возможностями пространственного разрешения, а также охватом зондируемой территории обеспечивается режимами обзора при съемке. Радиолокационная съёмка Земли ведётся при разных режимах обзора местности. В мировой практике для каждого режима есть закрепившиеся названия, в российской литературе есть их общепринятый перевод, однако режимы в проектируемых отечественных РСА аналогичные принципы за рубежом носят другие названия (Приложение 2) (*Верба и др., 2010; Костров, Толстов, 2017*).

Пространственное разрешение интерферометрических данных зависит от того, в каком режиме обзора поддерживается интерферометрический режим съемки. Отечественные радиолокационные программы «Кондор-ФКА» и «Обзор-Р» планируют обеспечение интерферометрии во всех режимах обзора, как и большинство КА их уровня. Очевидно, что чем выше пространственное разрешение, тем детальнее и информационные интерферометрические продукты.

Поляризация. Такой параметр как поляризация сигнала играет важную роль главным образом при изучении различных земных объектов от инфраструктуры – городской застройки, до растительных покровов и льдов. Изучение ряда объектов требует наличия всех поляризаций.

Так, например, при съемке лесной территории согласованная вертикальная поляризация (далее ВВ) несет информацию о плотности биомассы стволов, в то время как согласованная горизонтальная поляризация (далее ГГ) характеризует биомассу ветвей с горизонтальной ориентацией (*Le Toan et al., 1989*). Перекрестные или кросс-поляризации (далее ГВ и/или ВГ) применимы для подсчета уровня биомассы леса, т. к. сигнал многократно переотражается на ветках кроны и считается наиболее точным показателем (*Sinha et al., 2015*). В исследованиях полнополяризационных КА кросс-поляризации применяются для дешифрования опасных явлений в урбанизированных территориях: последствия землетрясений, затопления территории и т.п. (*Pelich, 2021*).

При интерферометрической съемке для построения ЦМР или выявления смещений, как правило, используются данные в согласованных

поляризационных режимах. Это связано с тем, что вследствие большего уровня отражения улучшается точность измерений рельефа местности. ВВ поляризация предпочтительнее, чем ГГ, так как для многих типов земной поверхности уровень отражения на этой поляризации выше (Захаров, 2013).

Углы визирования и направление съемки. Угол между местной вертикалью и линией, проходящей через точку падения зондирующего сигнала и точку съемки S (рис. 2.1, 2.2) называется углом визирования – θ . Выбор оптимальных углов визирования необходим для исключения (минимизации) геометрических искажений на исследуемой территории:

– радиолокационных теней на сюжетно важной части изображения (рис. 2.1);

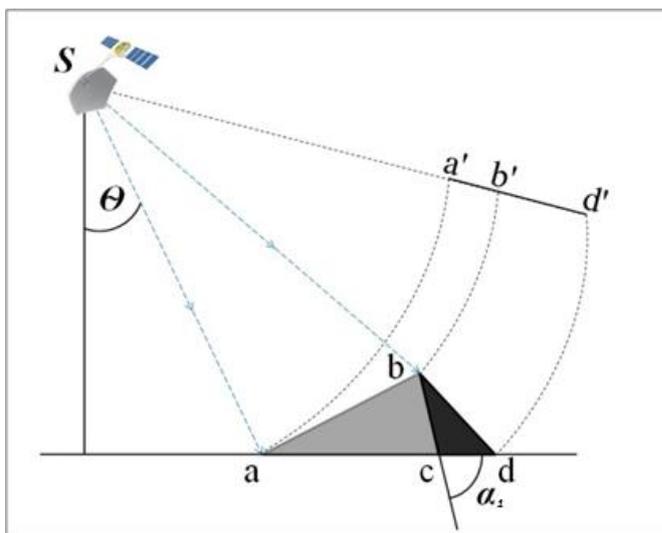


Рисунок 2.1. Геометрия формирования на РЛИ радиолокационной тени

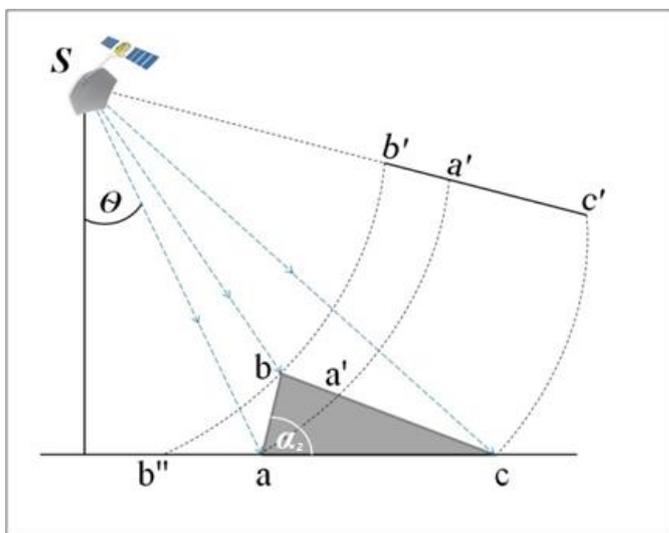


Рисунок 2.2. Геометрия формирования на РЛИ эффекта «переналожения» вершин и подножий склонов

– эффекта «переналожений» вершины и подножия склона на сюжетно важной части изображения (рис.2.2).

Условные обозначения (рис. 2.1, рис. 2.2):

α_1, α_2 – угол наклона местности – угол между

плоскостью, перпендикулярной к местной вертикали и плоскостью, касательной к земной поверхности в точке падения зондирующего сигнала;

θ – угол падения зондирующего сигнала – угол между местной вертикалью и линией, проходящей через точку падения зондирующего сигнала и точку съемки S;

aa', bb', dd' и $b''b b', aa', cc'$ – волновые фронты на рисунке 2-1 и рисунке 2-2 соответственно;

$a'b'd'$ и $b'a'c'$ – плоскости изображения;

S – точка съемки.

Образуются такие «артефакты» из-за того, что радиосигнал достигает вершины склона раньше, чем его подножия, вследствие чего подножие склона воспроизводится на РЛИ как более дальняя область от радиолокатора по сравнению с вершиной склона (Бадак и др., 2021).

Знания угла наклона местности α , как следует из рисунков (рис. 2.2, 2.3) позволяет определить оптимальные углы визирования, позволяющие воспроизвести на РЛИ горные и холмистые участки местности.

Учет геометрических эффектов при выборе направления съемки (восходящее или нисходящее) можно представить следующем образом (рис. 2.3).

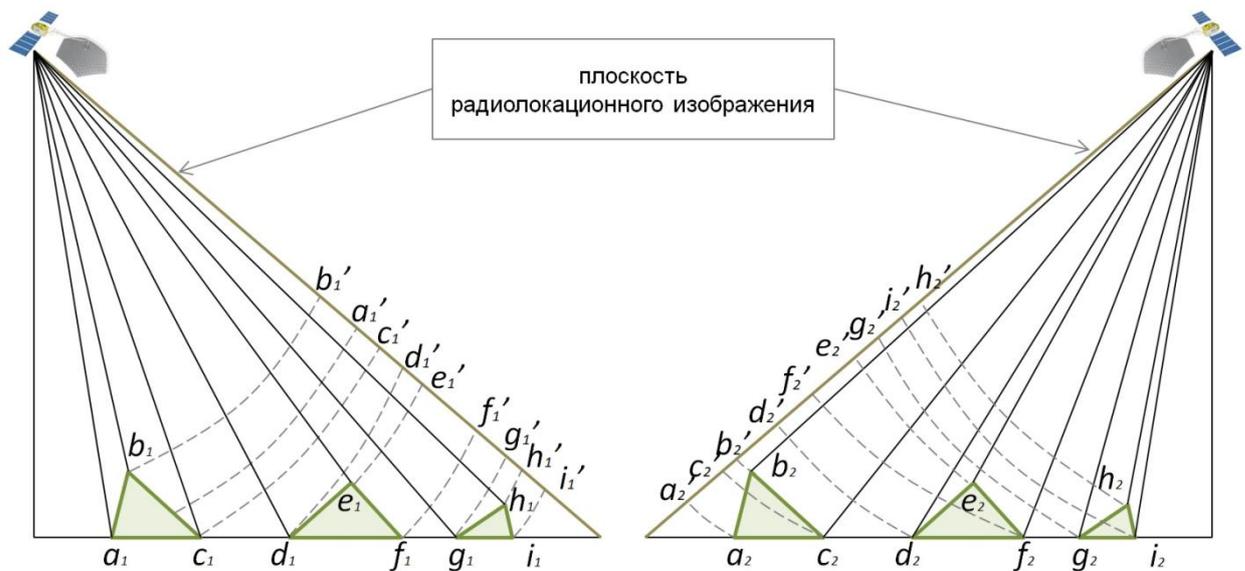


Рисунок 2-3. Геометрия радиолокационного изображения: левая – восходящий виток, правая – нисходящий виток, где b_1', h_2', e_2' – эффект переналожения вершин; i_1', a_2' в радиолокационной тени h_1', b_2'

Итак, при анализе рельефа местности снимаемой территории на примере (рис. 2.3) следует спроецировать, как на плоскости изображения будет отображаться территория. Из-за эффекта переналожения b_1', h_2', e_2' на радиолокационном изображении выглядит ближе, чем a_1', i_2', f_2' соответственно. Не освещаются РСА подножья i_1', a_2' , находящиеся в радиолокационной тени вершин h_1', b_2' . Так же для всех РЛИ характерны геометрические искажения,

связанные с растяжением и сжатием изображения, которые замены на отрезках между вершинами и подножьями треугольников (a_1b_1 , b_1c_1 , c_1d_1 и т.д.).

Параметры интерферометрической пары

Пространственная базовая линия. Величина пространственной базовой линии (схема см. рис 1-1) зависит от двух факторов: требований к конечному информационному продукту и рельефа местности. Общеизвестным является, что для мониторинга смещений стремятся минимизировать величину базовой линии, тем самым уменьшить топографический вклад в фазе (*Hanssen, 2001; Ferretti, 2014*), в то время как для построения ЦМР необходимо определять допустимый диапазон пространственной базовой линии.

В своей монографии Алесандро Феретти объясняет на 4 случаях необходимость минимизации перпендикулярной базовой линии при мониторинге смещений (*Ferretti, 2014*). Начиная с описания набора идеальных случаев, когда шумы и атмосферные эффекты пренебрежимо малы и никакие изменения отражательной способности не влияют на значения фазы интерферограммы ($\Delta\phi = 0$). Проведенное им моделирование интерферограмм позволяет интерпретировать реальные интерферограммы, в которых смешивается множество фазовых вкладов.

В первом случае РЛИ получены на некоторую область в разное время с абсолютно одинаковой траекторией вплоть до долей миллиметра с абсолютно одинаковой геометрией съемки – геометрическая базовая линия интерферометра равна нулю ($B=0$), т.е. две геометрии съемки идентичны. И без каких-либо аномалий распространения, вносимых атмосферой и в случае, когда в интервал времени между двумя изображениями не произошло смещений поверхности – на интерферограмме нет вариации фазы (рис. 2.4а). Во втором случае базовая линия также равна нулю, но на интересующей области есть деформация: на интерферограмме ненулевые значения фазы, пропорциональны изменению дальности (рис. 2.4б). Каждая интерференционная полоса на интерферограмме соответствует смещению вдоль линии визирования спутника, равному $\lambda/2$. В третьем случае при условии ровной местности и отсутствии смещений поверхности, когда геометрическая базовая линия не равна нулю: на интерферограмме появляется линейная фазовая составляющая, пропорциональная изменению дальности (рис. 2.4в). Отсюда следует важное

свойство: чем больше пространственная базовая линия, тем выше частота фрингов в направлении дальности. Эту фазовую компоненту обычно называют «компонентой плоской Земли». Поскольку расстояние между орбитами спутников (т.е. геометрическая базовая линия) обычно изменяется по азимуту, то фазовая составляющая в реальных интерферограммах медленно изменяется в зависимости от азимутальной координаты. В четвертом случае, если рельеф местности не равнинный, то на интерферограммах с ненулевой базовой линией наблюдаются линейные фазовые составляющие, пропорциональные пространственной базовой линии B_n – фазовые значения, модулированные локальным рельефом (рис. 2.4г). Как и в предыдущем случае, чем больше нормальная базовая линия, тем больше вариации фазы, обусловленные рельефом. После компенсации составляющей плоской Земли – топографической фазы – компенсируется плоская земная компонента, значения фазы становятся пропорциональными (в первом приближении) топографическому профилю.

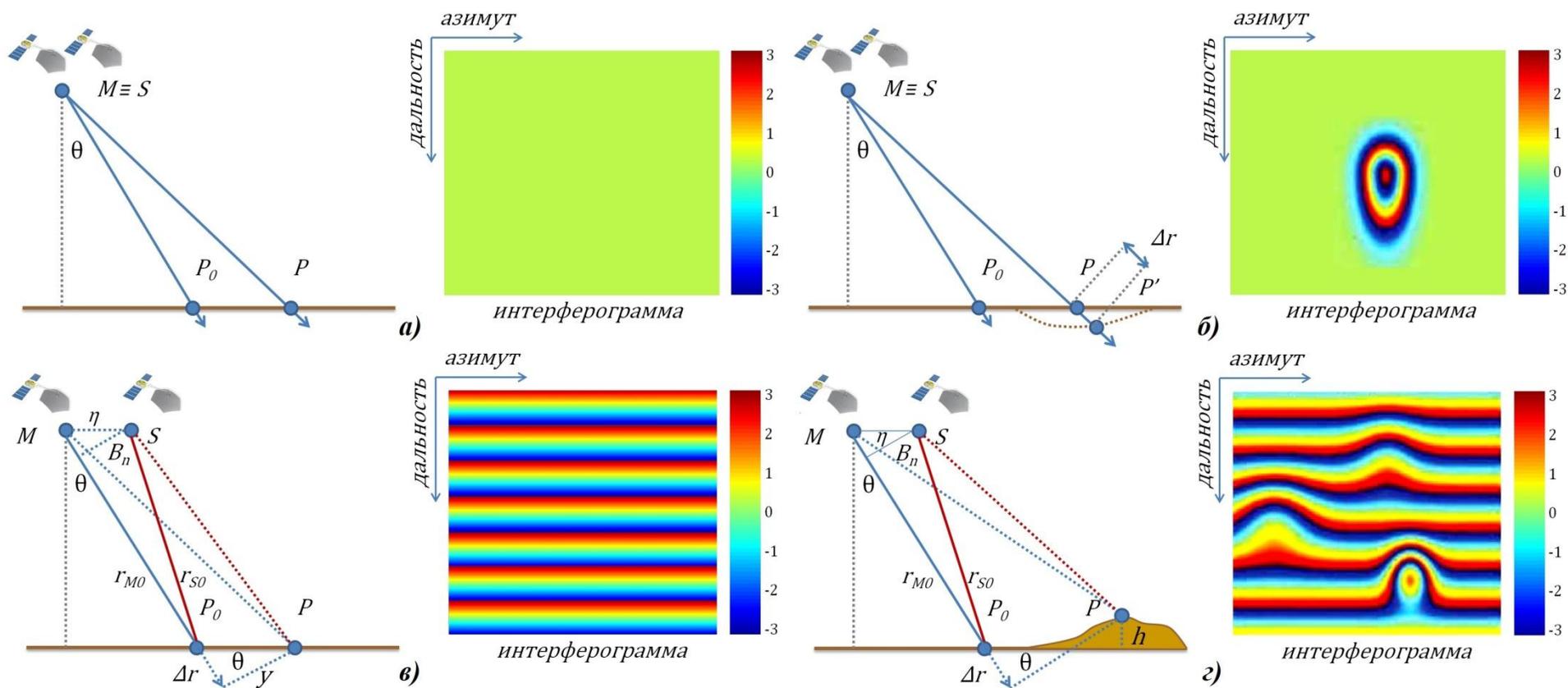


Рисунок 2.4. Четыре различных интерферометрических конфигурации: а) случай 1: нулевая базовая линия и деформация отсутствует; б) случай 2: нулевая базовая линия и ненулевая деформация; в) случай 3: деформация поверхности отсутствует, равнинный рельеф и ненулевая базовая линия г) случай 4: отсутствие деформации поверхности, не равнинный рельеф и ненулевая базовая линия (на основе Ferretti, 2014).

Если целью анализа является мониторинг деформационных явлений на поверхности во времени, то используется многовременная радиолокационная съемка. При многопроходной интерферометрии, т.е. когда временная базовая линия не равна нулю, любые вариации дальности могут быть вызваны либо движением цели, либо ненулевыми значениями нормальной базовой линии, либо тем и другим вместе: нулевые значения геометрической базовой линии – очень маловероятное исключение из общего правила, согласно которому спутниковые датчики никогда не проходят по одной и той же траектории в разное время.

Если целью анализа является формирование ЦМР, определение оптимальных значений поперечной базы B_n осуществляется на начальном этапе планирования интерферометрической съемки при выбранных ранее углах визирования. Неоднозначность по высоте h_a является важным параметром интерферометра, определяющим перепад высоты и их отображение на интерферограмме (см. раздел 1.3).

В разработанных при участии автора методических рекомендациях Научного центра Оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» и ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по проведению радиолокационной интерферометрической съемки (Бадак и др., 2021) была получена формула (2-1) определения нижней и верхней границы диапазона значений пространственной базовой линии:

$$\frac{\lambda N \operatorname{tg}(\theta) \sqrt{1-|\gamma|^2}}{4\pi \sqrt{2N} \sigma_{h_{\max}} |\gamma| \cos(\theta)} \leq B_n \leq \frac{\lambda N \sin(\theta)}{(4\Delta\varphi \operatorname{tg}(\alpha)) \cos(\theta)}, \text{ где} \quad (2-1)$$

λ – длина волны (м);

r – наклонная дальность (м);

θ – угол визирования (град);

γ – коэффициент когерентности;

N – количество некогерентных накоплений;

B_n – величина поперечной интерферометрической базы (м);

$\Delta\varphi$ – разница между двумя отсчетами интерферограммы, м.

Выбор нижней границы диапазона значений неоднозначности по высоте осуществляется исходя из требований по точности формируемой ЦМР. В то же время верхняя граница зависит от СКО оценки высоты σ_h , которая в свою очередь связана с СКО фазового шума – σ_φ , количества некогерентных накоплений – N и значений когерентности – γ .

Когерентность. Несмотря на то, что интерферометрическая когерентность является информационным продуктом обработки данных, существуют подходы к прогнозированию ее качества на основе физико-географической характеристики территории (сезонная изменчивость, климат, ландшафт и др.). Низкие значения когерентности представляют собой один из основных источников ошибок при интерферометрической обработке (Bamler, Hartl, 1998; Pepe, Calò, 2017). Один из факторов снижения когерентности – большие значения временной базовой линии, способствующие временной декорреляции. Из-за этого в ряде задач важное значение имеет показатель временной базы (Massom, Lubin, 2006). В то же время вторым фактором низких значений когерентности и наиболее высокими в наших исследованиях являются изменения, обусловленные деформациями земной поверхности. Однако к третьему фактору, приводящему к потере когерентности, следует отнести различия в характеристиках рассеивания сигнала со временем (Hanssen, 2001; Pepe, Calò, 2017), обусловленные изменениями в состоянии растительного покрова (вегетация, движение листьев из-за ветра), антропогенной деятельностью, замерзанием и оттаиванием грунта (Bamler, Hartl, 1998).

Так как значения когерентности по своему физическому смыслу чувствительны к изменениям земной поверхности, очевидно следует исключать сезоны года с резко изменчивой или дождливой погодой. К основным можно отнести следующие закономерности, полученные в результате разработки выше указанных методических рекомендаций (Бадак и др., 2021):

- значения когерентности различны для каждой природной зоны и сезонная изменчивость в них проявляется по-разному;
- перепад температур земной поверхности – переход через 0 – из-за изменения диэлектрических свойств отражающей поверхности оказывает наибольшее негативное влияние на когерентность пары РЛИ;
- в зимнее время года в тундре и на лесных территориях фиксируются максимальные значения когерентности. Лесные территории в остальное время года характеризуются крайне низкими значениями когерентности, не пригодными для интерферометрической обработки (варьируются около 0,1). В тундре наоборот летом отмечаются существенные значения когерентности в диапазоне от 0,5 до 0,7. Для пустынь высокие значения когерентности наблюдаются в течение всего года.

Выявленные ранее сезонные закономерности были дополнены в ходе изучения труднодоступных отдаленных территорий Российской Федерации и отражены в главах 3 и 4.

2.2 Обзор программного обеспечения, поддерживающего интерферометрическую обработку

Стремительное развитие области радиолокационного ДЗЗ влечет за собой неизбежный рост и современного программного обеспечения (ПО). В последние десятилетия выпущено значительное количество ПО, предназначенного для работы с РЛИ, однако не во всех реализована интерферометрическая обработка. Поэтому в таблице 2-2 представлены самые распространенные программные пакеты, выделенные на основании научных публикаций, с указанием их основных характеристик с точки зрения интерферометрической обработки.

Программное обеспечение можно разделить на свободно распространяемое (*open-source software*) и коммерческое. Одним из критериев общедоступности создаваемых методик является использование открытого ПО. Это связано с открытой политикой применения и дополнений

существующих алгоритмов, открытого API. В редких случаях разработчики коммерческого ПО предоставляют полные лицензии ученым безвозмездно, но доступ к исходному коду никогда. Однако на рынке радиолокационного ДЗ в последние годы и таких возможностей не наблюдалось.

Программное обеспечение с открытым исходным кодом

В программном обеспечении с открытым исходным кодом (прим. *open-source software*) можно выделить две группы: ПО с интерфейсом и консольные приложения, другими словами, программные модули.

Консольные приложения

ПО **Doris** (Delft object-oriented radar interferometric software), разработанное в Техническом Университете г. Дельфт (Delft University of Technology, DUT). Реализовано на C++ под основными операционными системами (ОС) (*DEOS URL: <http://doris.tudelft.nl>*). Для визуализации ПО Doris использует утилиты GMT, а для восстановления фазы интерферограммы – программу SNAPHU. Долгое время являлся наиболее популярным некоммерческим пакетом по количеству реализованных с его помощью научных исследований.

RAT (Radar Tools) представляет собой набор программных модулей для обработки РЛИ методами поляриметрии (PolSAR), интерферометрии (InSAR) и поляриметрической интерферометрии (PolInSAR). ПО разработано в Техническом Университете Берлина и реализовано на IDL (работает под управлением виртуальной машины IDL под основными ОС. Примечательным является свой собственный инструмент для восстановления фазы интерферограммы (*Reigber, Hellwich, 2004*), что редкость для некоммерческих программных комплексов.

ПО **ROI_PAC** (Repeat Orbit Interferometry Package) было разработано Лабораторией реактивного движения НАСА (NASA Jet Propulsion Laboratory) и Калифорнийским Технологическим Институтом. Программа находится в открытом доступе, однако с 2000 новых релизов не выпускалось. Сама программа получила развитие благодаря другим разработчикам,

включающим ее модули в свои программные комплексы (*Buckley et al., 2000*). Важно отметить, что ROI_PAC поддерживает работу с данными уровня 0 – радиоголограммами, ввиду чего многие разработчики до сих пор поддерживают интеграцию формата ROI_PAC, что подтверждает его востребованность при решении ряда интерферометрических задач.

GMTSAR, основанный на утилитах GMT, является одним из самых распространённых общедоступных модулей для интерферометрической обработки. Это первый из открытых программных кодов с реализацией метода малых базовых линий (SBaS). Одной из сложностей работы с ПО является его реализация под ОС Linux (*GMTSAR, URL: <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/>*). Однако сейчас можно встретить версии программы на языке программирования Python. Так, можно выделить библиотеку *PyGMT*, представляющую собой копию программы на языке программирования Python с разработкой интерфейса, выполненную двумя геофизиками из Бразилии (*PyGMT, URL: <https://www.pygmt.org>; Uieda et al., 2019*). Усовершенствованная библиотека *PyGMTSAR* представляет собой копию GMTSAR, ее разработчик Алексей Печников совместил в этой реализации два метода: SBaS и PS (*Python GMTSAR, URL: <https://pypi.org/project/pygmtsar/>*).

StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) реализует метод постоянных отражателей. ПО поддерживает обработку комплексных радиолокационных изображений. Предусмотрена интеграция с другими открытыми программами: радиоголограммы (РЛИ уровня 0) обрабатываются в ROI_PAC, формирование интерферограмм происходит при интеграции с ПО Doris (*STAMPS, URL: <https://homepages.see.leeds.ac.uk>*). Как и GMTSAR, StaMPS реализован под ОС Linux.

Интерфейсные приложения

Программное обеспечение **SNAP** (*The Sentinel Application Platform, URL: <https://step.esa.int>*) разработанное ESA, в первую очередь предназначено для обработки данных ДЗЗ, получаемых спутниками миссий ESA как

оптических, так и радиолокационных. SNAP является наследником программы **NEST** (The Next ESA SAR Toolbox) – программа для обработки и анализа РЛИ, начиная с Уровня 1. Активное развитие SNAP во многом происходит благодаря активному *open-source* сообществу. В последней версии появились полная интеграция с пакетом SNAPHU для восстановления фазы интерферограммы и алгоритмы устранения ионосферного вклада. Наличие графического интерфейса и пакетного режима обработки снимков делает это ПО, пожалуй, наиболее перспективным в рассматриваемой области.

С появлением SNAP большинство консольных приложений вошли и до сих пор входят в его реализацию, тем самым спрос на Doris, RAT и ROI_PAC отпадает и в настоящее время наличие интерфейсного приложения намного упрощает работу ученым-географам, не владеющим языками программирования. Остаются востребованными консольные приложения по дифференциальной интерферометрии GMTSAR и StaMPS.

Коммерческое программное обеспечение

SARscape – набор модулей для ПО ENVI, позволяющий выполнять полный комплекс обработки всех типов радиолокационных данных, включая все возможные интерферометрические алгоритмы обработки: классическая интерферометрия и дифференциальная интерферометрия, методы малых базовых линий и постоянных отражателей (*SARscape*, URL: <https://www.sarmap.ch>; *Sahraoui, 2006*). Это наиболее известное коммерческое ПО данного направления. В последних версиях модули SARscape работают под ПО QGIS, что делает его еще более привлекательным для пользователей, работающих с пространственными данными.

GAMMA Software – набор программных модулей для работы с РЛИ (*GAMMA*, URL: <https://www.gamma-rs.ch>). Два интерферометрических: интерферометрическая обработка для построения ЦМР, дифференциальная интерферометрия для оценки смещений. В ПО реализованы методы высокоточного совмещения РЛИ, развертка фазы разными алгоритмами

(Branch and Cut и Minimum Cost Flow), точный расчет интерферометрических базовых линий по наземным контрольным точкам. Поддерживает все форматы РЛИ со спутников гражданского применения (*Wegnüller et al., 2016*).

Менее популярным при интерферометрической обработке является **Erdas Imagine** (*Hexagon, URL: <https://hexagon.com/products/erdas-imagine>*). ПО уверенно зарекомендовало себя при работе с космическими снимками видимого диапазона и выход на рынок обработки РЛИ – скорее желание держать свои позиции. Тем не менее, широкого применения радиолокационные модули Erdas пока не получили, хотя реализованы все возможные методы работы с данными, в том числе интерферометрические. Стоит отметить опыт исследователей по части совмещения интерферометрии и стереообработки за счет функционала этой программы (*Amarsaikhan et al., 2007*).

PHOTOMOD Radar – российская программа для обработки ДДЗЗ, полученных РСА (*Ракурс, URL: <https://racurs.ru/program-products/photomod-radar>*). Модульная структура программы, как в случае и SARscape, и Erdas – функционал собран в модули, одноименные с процессом обработки, например, интерферометрический модуль. На сегодняшний день в ПО реализованы все методы интерферометрической обработки, имеется также свой алгоритм развертки фазы методом статистических сетей. Единственное на сегодняшний день ПО, поддерживающее форматы данных Кондор-ФКА.

Таблица 2-2. Перечень программных комплексов с алгоритмами для интерферометрической обработки

Название	Разработчик	Год последнего релиза	Интерферометрия	Метод развертки фазы	Поддерживаемые КА с РСА
Программное обеспечение с открытым исходным кодом					
Интерфейсные приложения					
SNAP	ESA	2022	InSAR, DInSAR	SNAPHU	Все гражданские КА
консольные приложения					
Doris	Делфтский технический университет, Нидерланды	2009	InSAR	SNAPHU	ERS1/2, ENVISAT, JERS, RADARSAT, ALOS and TERRASAR-X
RAT	Берлинский технологический университете, Германия	2007		свой	E-SAR, ENVISAT, RADARSAT-2, PolSARPro
ROI_PAC	НАСА и Калифорнийский Технологический Институт, США	2000	InSAR	SNAPHU	н/д

GMTSAR	Калифорнийский университет в Сан-Диего, США	2022	InSAR SBaS	SNAPHU	ERS-1/2, Envisat, ALOS-1, TerraSAR-X, COSMOS-SkyMed, Radarsat-2, Sentinel-1A/B, and ALOS-2
StaMPS	Стэнфордский университет, США	2018	PSI	SNAPHU	ERS-1/2, Envisat, ALOS-1/2, Radarsat-1/2, Sentinel-1A/B
Коммерческое программное обеспечение					
SARscape	SARMAP, Швейцария	2022	InSAR DInSAR SBaS PSI	SNAPHU	Все гражданские КА
GAMMA SAR	GAMMA, Швейцария	2022	InSAR PSI	оптимизированный SNAPHU	Все гражданские КА
ERDAS Imagine	HEXAGON, Швеция	2022	InSAR DInSAR	SNAPHU	Все гражданские КА
PHOTOMOD Radar	Ракурс, Россия	2022	InSAR DInSAR SBaS PSI	Метод статистических сетей	Все гражданские КА

Стоит отметить, что важным этапом интерферометрической обработки является процедура развертки фазы и на сегодняшний день существуют многочисленные реализации математических алгоритмов (*Yu et al., 2013*). Особую популярность получил разработанный в Стэнфордском университете модуль SNAPHU (*Stanford SNAPHU, <http://web.stanford.edu/>*), реализованный в большинстве ПО (таблица 2-2). SNAPHU представляет собой реализацию алгоритма статистической стоимости (minimum cost flow – MCF) и сетевого потока (minimum spanning tree – MST) для развертывания фазы, предложенного Ченом и Зибкером (*Chen, Zebker, 2002*). Этот алгоритм представляет развертку фазы как задачу оценки максимальной апостериорной вероятности (maximum a posteriori probability – MAP), цель которой состоит в том, чтобы вычислить наиболее вероятное развернутое решение с учетом наблюдаемых входных данных. Поскольку статистика, связывающая входные данные с решением, зависит от измеряемой величины, SNAPHU включает три встроенные статистические модели: для топографических данных, данных о деформации и сглаженных общих данных. Программное обеспечение находится в свободном доступе (*Hooper, 2010*).

Программное обеспечение является важной частью разработки методик применения радиолокационных данных для решения географических задач. Как мировых лидеров можно отметить ПО SARscape швейцарской фирмы SARMAP, а на российском рынке успех получил ПО PHOTOMOD RADAR российской фирмы «Ракурс». Эти два программных комплекса обладают разнообразным функционалом для формирования всех возможных высокоуровневых информационных продуктов. Также они поддерживают форматы всех КА, находящихся на орбите (не включая военные программы), однако, например, данные Кондор-ФКА на настоящий момент могут быть распакованы только в ПО PHOTOMOD RADAR. Тем не менее, стремительное развитие программного обеспечения с открытым программным кодом, такого как SNAP, хотя и уступает в функциональности,

но не отстает от формируемых информационных продуктов (некоторые возможно получить при интеграции с другим открытым ПО). И также SNAP является разработкой ЕКА конкретно под группировки Sentinel, ввиду чего происходит его перманентная доработка и модификация инструментария. Альтернативные общедоступные варианты реализованы в виде консольных приложений и чаще всего под ОС Linux. Многие из них уже более 15 лет не обновляются, из чего следует отсутствие возможностей обработки новых форматов РЛИ и как следствие – невозможность работы с данными Sentinel-1. В то же время все рассмотренные модули активно внедряются в коммерческое программное обеспечение.

2.3 Пространственная информация для обработки РСИ

В интерферометрической фазе присутствуют атмосферное и ионосферное влияние, и шумы приемной системы и топографическая составляющая, определяемая рельефом местности (2-2). На основе анализа основных параметров фазы интерферограммы, которая складывается из нескольких вкладов – фазовых набегов, были сформированы минимальные требования к дополнительной пространственной информации:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{diff}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_n \quad (2-2)$$

φ_{topo} – фазовый набег за счёт съёмки пересеченной местности под разными углами;

φ_{diff} – фазовый набег за счёт смещения поверхности в период между съёмками;

φ_{atm} – фазовый набег в силу преломления в среде распространения сигнала;

φ_n – вариации фазы в результате электромагнитного шума.

В зависимости от формируемого продукта происходит учет этих вкладов. φ_n как правило постоянный для каждого космического аппарата и указывается в метаданных. Существуют различные математические подходы к учету φ_{atm} . При формировании ЦМР интерферометрическим методом φ_{diff}

минимизирует за счет уменьшения временной базы, поэтому и отдают предпочтение тандемному режиму. В случае же определения изменений или смещений вычитается $\varphi_{\text{торо}}$.

Если постоянный φ_n указывается в метаданных и не зависит от способа обработки, то учет остальных параметров имеет большое значение, что будет показано далее.

Цифровая модель рельефа. ЦМР участвует на двух этапах обработки. *Первая область применения:* при корегистрации РЛИ. Субпиксельная точность совмещения изображений – одно из основных условий качества интерферометрической обработки (Li., Bethel, 2008). Как правило, в программы заложен алгоритм совмещения РЛИ из 3 итераций. Первая итерация – самая грубая корегистрация, выполняется на основе информации об орбитах, по которым двигались спутники во время выполнения съемки – удается совместить снимки с точностью около 30 пикселей.

Вторая итерация – на этом этапе вычисляется смещение дополнительного снимка относительно основного по азимуту и по дальности. Получаемая в результате точность совмещения снимков составляет около одного пикселя. Алгоритм работает следующим образом: для заданного набора областей на снимке (распределенных случайным образом или заданных во входном файле) – т.н. «окон» – вычисляется корреляция между основным и дополнительным снимками при различных взаимных смещениях. Оценкой смещения снимков для данного окна является смещение, при котором достигается самый высокий коэффициент корреляции. Смещение между изображениями полагается равным значению чаще всего встречающихся среди оценок смещений, полученных для отдельных окон.

На этапе третьей итерации совмещение снимков производится с помощью полученной ранее ЦМР. Для каждого пикселя основного снимка вычисляются соответствующие значения интенсивности (действительные числа) на дополнительном снимке. Корегистрация с помощью ЦМР не

зависит от корреляции между основным и дополнительным снимками. Следовательно, можно предотвратить ошибки, связанные с недостаточным количеством или неудачным расположением окон корреляции. Использование ЦМР повышает точность совмещения пары снимков с большой длиной базовой линии или сложным рельефом. Эти уточнения особенно значительны для снимков КА, работающих в X-диапазоне, например, для TerraSAR-X.

Вторая область применения ЦМР: удаление топографической фазы – $\varphi_{\text{топо}}$ при двухпроходной дифференциальной интерферометрии осуществляется при помощи моделирования рельефа (топографической фазы) по ЦМР. Таким образом, от точности воспроизведения рельефа местности зависит точность определения смещений. А сам выбор ЦМР играет важную роль в оценке смещения вдоль линии визирования LOS и в исправлении ошибок, вызванных топографической фазой, что подробно изложено в статье (Devaraj, Yarrakula, 2022). Учеными была проведена оценка вариаций смещения LOS при вычитании топографической фазы по следующим ЦМР: SRTM, ALOS и Cartosat DEM (рис 2-4). Сравнение значений смещений с наземными измерениями и полученными при обработке с разными ЦМР, показало, что характеристики смещения LOS, полученные с SRTM и Cartosat DEM (с разрешением 30 м), сильно коррелируют с ALOS DEM (с разрешением 12,5).

Можно сделать вывод о том, что ЦМР с более высоким разрешением может повысить качество результатов определения смещений. Так, ЦМР, полученная на область исследования с помощью БПЛА, во время съемки со спутника поможет получить ЦМР без потери топографической информации, что в перспективе может улучшить качество результатов дифференциальной интерферометрии.

Исключения ложных смещений в условиях труднодоступных отдаленных территорий и отсутствия актуальной ЦМР проводятся путём анализа полученных результатов смещений на предмет корректности.

Атмосферный вклад. Атмосферный вклад обычно разделяют на 2 составляющие: ионосферные и тропосферные.

Принято считать, что полное содержание электронов в ионосфере достигает максимума на высоте 300–400 км (*Gomba et al., 2015; Xiao et al., 2022*). Ионосферный вклад или ионосферная задержка является одним из наиболее значимых источников ошибок в низкочастотных диапазонах. В интерферограммах фаза содержит в себе вклад рельефа и смещений, смешанных с ионосферными возмущениями (*Xu et al., 2004*). Чтобы избежать смещений, вызванных ионосферной задержкой, ее необходимо оценить и устранить (*Meyer, 2011*).

Так, для больших длин волн, например, для РСА в диапазонах Р и L, сдвиг фазы сигнала радара становится более значительным: влияет ионосфера из-за эффекта, вызванного изменениями количества свободных электронов на пути движения сигнала (*Gray et al., 2000*). Ионосферные искажения при распространении микроволн вызывают дополнительную групповую задержку и фазовые скачки на интерферограммах, величина которых обратно пропорциональна частоте радиолокатора. По этой причине РСА L-диапазона, такие как усовершенствованный спутник ALOS-2 с фазированной решеткой (PALSAR) или будущий TanDEM-L, из-за более низкой частоты испытывают более сильные ионосферные искажения по сравнению с системами С- или Х-диапазонов, в то время как ионосферный вклад для S- и С-диапазона зависит от широты согласно работам (*Fattahi et al., 2017; Liang et al., 2019*). Это объясняется тем, что в средних широтах ионосфера наиболее спокойна, с медленными пространственными колебаниями, за исключением некоторых редких случаев, как геомагнитные штормы. В низких широтах ионизация самая высокая, потому что солнце находится в основном «над головой». По обе стороны геомагнитного экватора, на геомагнитных широтах примерно от 10° до 15°, ионизация достигает максимума. Экваториальная аномалия – эффект, называемый также по фамилии автора – Эпплетон, впервые описавшего его в 1946 г

(*Appleton, 1946*). Для интерферометрии одной из типичных областей с видимым эффектом максимальной ионизации является север Чили, где на многих интерферограммах наблюдались сильные ионосферные эффекты (*Pi et al., 2011; Pi, 2015; Meyer et al., 2015*). Другим хорошо известным явлением в низких широтах являются экваториальные мерцания, обычно наблюдаемые в виде амплитудных полос в радиолокационных изображениях. В высоких широтах ионосфера связана через геомагнитное поле с внешней магнитосферой и солнечным ветром. Частицы, заряженные энергией внутри магнитосферы или от Солнца, попадают в ионосферу, становясь еще одним основным источником ионизации (*Hunsucker, Hargreaves, 2007; Zolesi et al., 2014*). Множество вовлеченных динамических процессов делают высокоширотную ионосферу подверженной самому высокому уровню вариаций, которые вызывают артефакты, наблюдаемые даже в данных С-диапазона (*Gray et al., 2000; Joughin et al., 2010*). Возможно, наиболее известными природными явлениями в высоких широтах представляют собой полярные сияния, которые являются следствием попадания энергичных частиц в атмосферу из магнитосферы. Между средними и высокими широтами около $60^\circ \sim 65^\circ$ существует область пониженной ионизации, называемая главным желобом. Концы впадины обычно обнаруживаются через час после захода солнца и за час до восхода солнца. Это явление также наблюдается на РЛИ (*Pi et al., 2011*).

При определении смещений атмосферные вклады и их учет имеют большое значение. Рисунок 2-5г представляет собой наиболее реалистичный пример смоделированной интерферограммы, полученной на участок земной поверхности, где произошло смещение (см. рис. 2.4б), и имеющей фазовую составляющую, связанную с базовой линией (см. рис. 2.4г). На рис. 2.5а и 2.5б приведены два примера влияния турбулентности и топографически зависимых атмосферных компонент, а на рис. 2.5в показан вклад фазового шума, влияющего на некоторые области изображения. Следует отметить, что атмосферные эффекты пространственно коррелированы, в то время как

фазовые компоненты шума некоррелированы: эта особенность используется в серийных интерферометрических методах. На рис. 2.5г представлена итоговая интерферограмма: топографические (базовые), деформационные, атмосферные и шумовые компоненты.

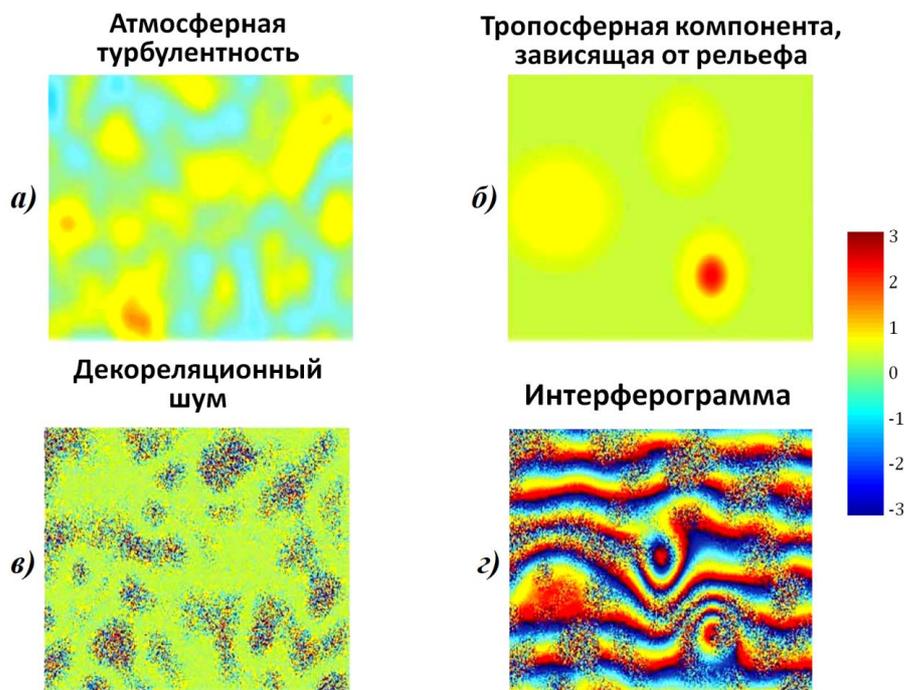


Рисунок 2.5. Смоделированные интерферограммы с различными вкладами: а) Пример влияния атмосферной турбулентности на интерферограмме. Горизонтальная и вертикальная оси соответствуют координатам азимута и дальности соответственно. б) Пример атмосферных компонент, связанных с рельефом местности. в) Фазовый шум, влияющий на некоторые области изображения. г) Пример интерферограммы, полученной на участок земной поверхности, где произошло смещение (на основе Farretti, 2014)

Наиболее заметно влияние тропосферы при радарной интерферометрической съемке Земли из космоса в схеме наблюдения с повторяющихся орбит космического аппарата. Особое влияние заметно в сравнительно коротковолновых диапазонах, таких, как С- или X-диапазон. В связи с этим коррекция тропосферных задержек является одной из самых больших проблем, стоящих перед научным сообществом при интерферометрической обработке. Пространственные и временные изменения температуры, давления и относительной влажности создают тропосферные задержки в интерферометрических данных, маскируя небольшие смещения поверхности из-за тектонических или вулканических

деформаций (*Hooper et al., 2013; Bekaert et al., 2015*). При решении ряда задач предполагается, что тропосфера является горизонтально стратифицированной средой, свойства которой изменяются только в вертикальном направлении (*Кравцов и др., 1983*).

Методы тропосферных коррекций при интерферометрической обработке можно разделить на три группы: 1) эмпирические, 2) статистические и 3) прогностические поправки. С помощью эмпирических поправок пытаются уменьшить тропосферные эффекты путем моделирования связи между высотой и значениями интерферограммы (*Wicks et al., 2002; Lin et al., 2010; Bekaert et al., 2015a; Yunjun et al., 2019*). Эти методы могут быть весьма успешными, но они не работают, когда атмосферная турбулентность преобладает над тропосферными эффектами (*Liang et al., 2018*), и могут создавать проблемы, когда деформация коррелирует с рельефом (*Delacourt et al., 1998*). Вторая категория поправок направлена на уменьшение тропосферных задержек на основе временных рядов радиолокационных изображений или интерферограмм с использованием статистических, геостатистических или корректирующих алгоритмов, таких как суммирование (*Sandwell, Sichoix, 2000*), метод наименьших квадратов, методы на основе эмпирической модели деформации (*Berardino et al., 2002; Cao et al., 2018; Li et al., 2019*) или пространственно-временной фильтрации (*Ferretti et al., 2001, 2011; Hooper, 2008; Cao et al., 2019*). К сожалению, статистические подходы обычно не очень эффективны, поскольку они основаны на усреднении стохастических свойств пространственно-временных тропосферных задержек и обычно требуют большого количества РЛИ для получения удовлетворительных результатов (*Cao et al., 2021; Siddique et al., 2018*). Третья группа методов, прогностические поправки, использует вспомогательные наборы атмосферных данных для расчета и коррекции тропосферных задержек интерферометрии. Было представлено множество алгоритмов, которые используют либо одну метеорологическую характеристику, либо несколько

различных, полученных с местных метеорологических станций (*Li et al., 2004*), измерений GPS (*Williams et al., 1998; Webley et al., 2002; Onn et al., 2006; Löfgren et al., 2010; Houlie et al., 2016; Zhang Z. et al. 2021*), спутниковых мультиспектральных наблюдений MERIS (спектрометр среднего пространственного разрешения на борту спутника ENVISAT) (*Li et al., 2006, 2009, 2012*) и MODIS (спектрометр с низкого пространственного разрешения на борту спутников Terra и Aqua) (*Li, 2005; Kim et al., 2017*), и модели погоды (*Wadge et al., 2002; Foster et al., 2006; Liu et al., 2009; Doin et al., 2009; Hobiger et al., 2010; Jolivet, Grandin, et al., 2011; Jolivet et al., 2014; Cao et al., 2021*). Эффективность прогностических поправок в принципе зависит от пространственно-временного разрешения и точности метеорологических данных или выходных данных модели погоды, но доступность достаточно качественной внешней информации обычно является основным ограничением этих методов.

С развитием глобальных атмосферных моделей, включая глобальный и региональный реанализ и оперативные модели погоды такие как: NARR (*Mesinger et al., 2006*), ERA-Interim (*Dee et al., 2011*), MERRA-2 (*Gelaro et al., 2017*), HRES (*Haiden et al., 2018*), многие исследования продемонстрировали потенциал использования прогностических поправок на основе модельной информации для уменьшения тропосферных задержек (*Jolivet et al., 2014; Parker et al., 2015; Hu, Mallorquí, 2019; Murray et al., 2019; Shen et al., 2019*). Благодаря глобальному охвату возможности использования в любую погоду и в любое время, с географической привязкой, эти прогностические подходы, скорее всего, станут постоянной процедурой обработки для коррекции тропосферных задержек. Однако, поскольку пространственное разрешение моделей все еще на порядок ниже по сравнению с разрешением радиолокационных изображений, то о внедрении в методику интерферометрической обработки информации говорить рано.

Тот же недостаток касается и методов, основанных на применении данных спектрорадиометров. Они остались в прошлом, т.к. имеют низкое

пространственное и временное разрешение. Однако, стоит выделить исследование (*Bekaert et al., 2015; Murray et al., 2019*), где был выполнен статистический анализ нескольких различных методов тропосферной коррекции, которые можно использовать для коррекции отдельной интерферограммы. Для расчета поправок использовались данные спектрорадиометров: MERIS с пространственным разрешением ~ 1,2 км; MODIS с разрешением 1 км; модели погоды ERA-I из архива Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) с пространственным разрешением 80 км, локальная Модель исследования и прогнозирования погоды (Weather Research and Forecasting Model – WRF) с пространственным разрешением 7 км. Все эти методы были включены в свободно распространяемое ПО TRAIN (Toolbox for Reduction Atmospheric InSAR Noise), предназначенного для уменьшения атмосферного шума в интерферограммах (*TRAIN, URL: <https://github.com/dbekaert/TRAIN>*). Тем не менее, этот программный комплекс нашел широкое применение при многосерийных методах определения смещений – SbaS, PSI (*Dong et al., 2019; Aslan et al., 2020*), в то время как оценку результатов классической двухпроходной дифференциальной интерферометрии целесообразно проводить при непосредственном сопоставлении с метеорологическими параметрами (*Шуршова и др., 2023*).

Влияние атмосферы на интерферометрическую съемку и ее учет при обработке является актуальным научным направлением, где активно изучаются возможности комбинирования с метеорологическими данными, оптико-электронными данными. Ионосферная коррекция необходима не во всех диапазонах длин волн, наибольший вклад ее наблюдается в данных L-диапазона и для высоких широт при съемке в C-диапазоне (*Gomba et al., 2015; Liang et al., 2019; Xiao et al., 2022*). В условиях разработки методик по данным C-диапазона ионосферным вкладом можно пренебречь в виду его обоснованной ранее незначительности, в то время как тропосферный учесть

будет учитываться при сопоставлении с погодной информации за неимением других данных.

2.4 Исходные данные для разработки методик

При разработке методик автор руководствовался принципом доступности данных, а это возможно только при условии их свободного распространения, как в случае Sentinel-1. 3 апреля 2014 г. на орбиту был выведен спутник Sentinel-1A, первый аппарат космической системы Sentinel, а 6 апреля 2016 года – его близнец Sentinel-1B. Спутники осуществляют радиолокационную съёмку в С-диапазоне с круглосуточной поставкой космических снимков. К сожалению, Sentinel-1B прекратил свою работу по официальному заявлению ЕКА в декабре 2021 года и на сегодняшний день доступны только архивные данные с него. Стоит отметить, что именно Sentinel-1B снимал бóльшую часть территории России, его остановка существенно сократила поток данных.

Особенности интерферометрических данных Sentinel-1.

КА Sentinel-1 поддерживает интерферометрическую съёмку в широкозахватном режиме с шириной полосы обзора 250 м и пространственным разрешением 5x20 м по наклонной дальности, азимуту (ESA, URL: <https://sentinels.copernicus.eu>). Его данные свободно распространяются Европейским космическим агентством (ЕКА). Режим широкополосной интерферометрической съёмки (IW) является основным режимом для съёмки суши. Одной из особенностей съёмки Sentinel-1 является режим обзора *TOPSAR* (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), представляющий собой модификацию широкозахватного режима, благодаря которой существует вариативность углов визирования. В таблице 2-3 указаны характеристики в зависимости от IW полосы и на рисунке 2-6 они схематично представлены (De Zan, Guarnieri, 2006). Диапазон углов визирования примерно от 27° до 46°.

Таблица 2-3: Углы визирования для интерферометрических подполос

Главный лепесток диаграммы направленности антенны	IW 1	IW 2	IW 3
Углы визирования на минимальной высоте орбиты	30.86° - 36.59°	34.47° - 41.85°	41.75° - 46.00°
Углы визирования на максимальной высоте орбиты	29.16° - 34.89°	34.77° - 40.15°	40.04° - 44.28°

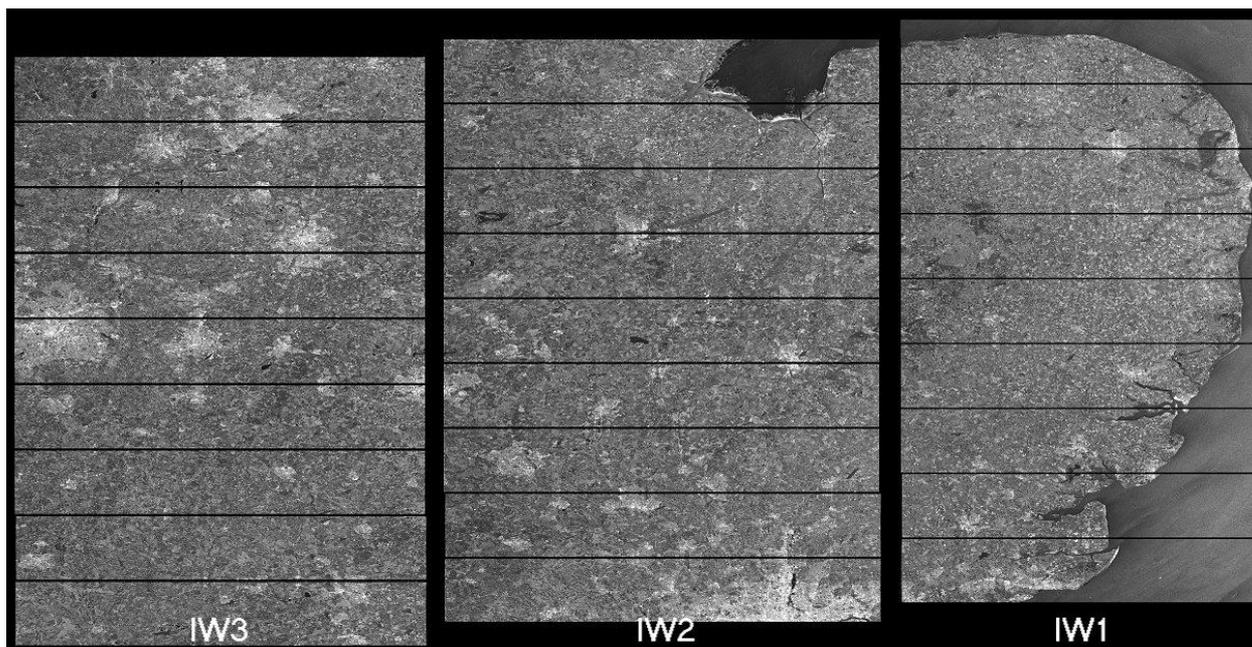


Рисунок 2.6. Интерферометрические широкие полосы и подполосы (ESA, URL: <https://sentinels.copernicus.eu>)

В интерферометрическом режиме съемка осуществляется на восходящем и нисходящем направлении орбиты при поляризационных режимах ВВ+ВГ, ГГ+ГВ с пространственным разрешением 5x20 м при полосе захвата 250 км.

Проведенный обзор программного обеспечения обосновывает выбор SNAP. Во-первых, при работе с данными Sentinel-1 он представляет собой надежный инструмент, т.к. разрабатывается именно для данных, получаемых с КА ЕКА. Во-вторых, в программном комплексе реализованы все необходимые для интерферометрической обработки алгоритмы. В-третьих, этот программный комплекс несмотря на то, что является свободно распространяем с открытым программным кодом, что позволяет внедрять свои алгоритмы.

Также ПО SNAP располагает функционалом по добавлению в необходимые процедуры обработки ЦМР. Так, удаление топографической фазы производится путем заложенного в ПО алгоритма моделирования интерферограммы без возможности визуализации. Отдельно смоделировать интерферограмму по ЦМР с возможностью визуализировать на сегодняшний день можно только в ПО PhotomodRadar в одноименном модуле «*Моделирование интерферограммы*». При обработке в SNAP есть возможность использовать ЦМР в трех вариациях: автоматически подгружаемые глобальные ЦМР (ACE, CDEM, Copernicus 30/90 м, GETASSE, SRTM); глобальные ЦМР поддерживаемого формата, но скачиваемая самостоятельно (ASTER, SRTM); локальная ЦМР в формате GTiff (охват ЦМР должен быть на 10-15% больше по размеру интерферограммы).

Метеорологические данные. Радиолокация является всепогодной съемкой и на получение радиолокационного изображения не влияет изменение погоды, но при обработке данных многовременных съемок, к которым относится интерферометрическая (исключая тандемную) влияние погодных факторов на результаты колоссально и надо учитывать влияние атмосферы – тропосферного вклада. В последние годы все чаще среди работ наших ученых можно найти подходы к анализу основных погодных параметров (*Бондур и др., 2019; Захарова, Захаров, 2019; Ширшова, Балдина 2021, Ширшова, 2023*), к ним относятся: температура, давление, относительная влажность, облачность, тип облаков и высота нижней кромки. Именно эти метеорологические параметры при условиях изменения среды обусловят изменения сигнала и соответственно потерю когерентности.

При проведении исследования были проанализирован ряд общедоступных информационных ресурсов, предоставляющих метеоданные, в исследовании учитывалась информация с ниже приведенных ресурсов:

1. Сайт Гидрометцентра России (*URL: <https://meteoinfo.ru/>*), где публикуется данные напрямую из Гидрометцентра России

2. Сервер «Погода России» (*URL: <http://meteo.infospace.ru/>*) представляет собой подробный архив метеоданных по 5000 станциям мира. Данные представлены с декабря 1998. Опубликованы все основные метеопоказатели по вертикальному состоянию тропосферы.

3. Сайт «Погода и климат» (*URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/>*) располагает информацией с метеостанций, расположенных по всему миру. Архив погоды доступен с 2001 года.

4. Дневники погоды на сайте GISMeteo (*URL: <https://www.gismeteo.ru/>*), где собрана основная информация о погоде, усредненная за день: температура, давление, облачность, явления и ветер.

5. Расписание погоды в мире (*URL: <https://rp5.ru/>*). На сайте представлены прогнозы погоды на ближайшие семь суток, информация о фактической погоде, зафиксированная на наземных станциях, а также свободно распространяемые архивы в табличном формате.

Для территории РФ под каждую территорию выбор следует выбирать один из возможных ресурсов с метеорологической информацией индивидуально.

Выводы к главе 2

1. В результате анализа параметров РЛИ, важных для интерферометрической обработки, выявлена первостепенная роль предварительной оценки физико-географических характеристик местности. Так, угол визирования и виток съемки напрямую связаны с рельефом местности, без его учета невозможно определение, каких объектах земной поверхности затронут геометрические эффекты РЛИ. Установлена принципиальная значимость прогнозирования значений когерентности между двумя изображениями, так как от ее качества зависит возможность формирования информационных продуктов: ЦМР и карты смещений.

2. Для интерферометрической обработки и анализа формируемых в результате информационных продуктов необходимо привлечение дополнительной пространственной информации – ЦМР и параметров

тропосферы. Потребность в такой пространственной информации обоснована особенностями территории исследования. ЦМР применяется для точного совмещения изображений – для достижения субпиксельной точности, необходимой для интерферометрической обработки. Параметры тропосферы позволяют спрогнозировать значения когерентности между изображениями и оценить корректность полученных информационных продуктов.

3. Для разработки методик выбраны данные со спутника Sentinel-1, осуществляющего съемку в С-диапазоне. Ввиду перспектив отечественной радиолокации: «Кондор-ФКА» и «Обзор-Р» (*РСА в S и X диапазонах, а С – находится между X и S*), разработанные методики впоследствии можно будет перенести этот опыт на российские данные. Для разработки методик выбрано ПО SNAP, так как его поддержка ведется в первую очередь для обработки данных с Sentinel-1. Данные и программное обеспечение свободно распространяемы, что позволяет разработанные методики сделать общедоступными. В качестве источника информации о погоде обозначен ряд источников, которые получают информацию с метеорологических станций и распространяют ее.

Глава 3. Методика применения мультивременного композита с когерентностью (МТС) для мониторинга и картографирования малых арктических островов (на примере о. Визе, Карское море)

3.1 Физико-географическая характеристика острова Визе и обоснование объекта исследования³

Геология. Остров Визе относится к группе островов Центрального Карского плато – шельфу с максимальными глубинами в 50–100 м. Он сложен нижнемеловыми песчаниками и представляет собой пологоувалистую равнину (Романенко, 2008, 2022). Меловые отложения представлены песками мощностью 30 м, содержащими обломки кремневой древесины и тонкие (2–4 см) прослойки, состоящие из обломков обугленной древесины, а также песчаниками мощностью до 1–2 м. Четвертичные отложения представлены единичными валунами двуслюдяных гранитов, кварца и песчаников верхнего и нижнего плейстоцена, голоцена – песчано-галечники морского генезиса, двуслюдяных гранитов, кварца и песчаников, а также ракушниками.

Геологическая эволюция большей части островов Карского моря рассматривается только начиная с мелового периода, когда на описываемой территории накапливались континентальные и прибрежно-морские угленосные отложения. Так, к началу четвертичного периода относят затронувшие эти породы сбросовые и пологие складчатые дислокации, а также проявления диапиризма. Учитывая обнаружение на острове эрратических валунов, считается, что Центральное Карское плато покрывалось континентальными льдами, двигавшимися с северо-востока,

³ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Шириова В.Ю., Балдина Е.А. Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — №4. — С. 79-91.

Балдина Е.А., Шириова В.Ю., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю. Динамика береговой линии и состояния поверхности малых арктических островов (Визе и Ушакова) по разновременным оптическим и радиолокационным снимкам // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2022. — №1. — С. 107-122.

востока и юго-востока. Конец плейстоцена и современная эпоха характеризовалась трансгрессией, которая во время атлантического оптимума несколько отстала от поднятия Центрального Карского плато.

Рельеф. Остров Визе расчленен густой термоэрозионной сетью, которая придает рельефу чисто эрозионный характер (Дибнер, 1970): ровная поверхность острова изрезана многочисленными ложбинами. Между ложбинами возвышаются невысокие (не более 22 м над у.м.) холмы.

Холмы разделяют узкие ложбины, которые в летний период представляют собой русла рек и ручьев, в то время как замкнутые котловины заполняются талой водой, образуя тем самым мелководные озера. Большинство из таких озер летом пересыхают, а зимой промерзают до дна. Прибрежные озера, как правило, соленые. На острове имеются две лагуны: в юго-западной части острова, которая отделяется от моря песчано-каменистыми косами, и в северо-западной, отделенная широким перешейком. Почва преимущественно песчано-глинистая с включениями битого плитняка.

Отдельные холмы исключительно песчаные.

Остров характеризуется также термоэрозионными обрывистыми берегами с аккумулятивными террасами (рис. 3.1) (Романенко, 2008).

Важную роль в рельефообразовании острова играют морские льды. Они оказывают на прибрежно-шельфовую

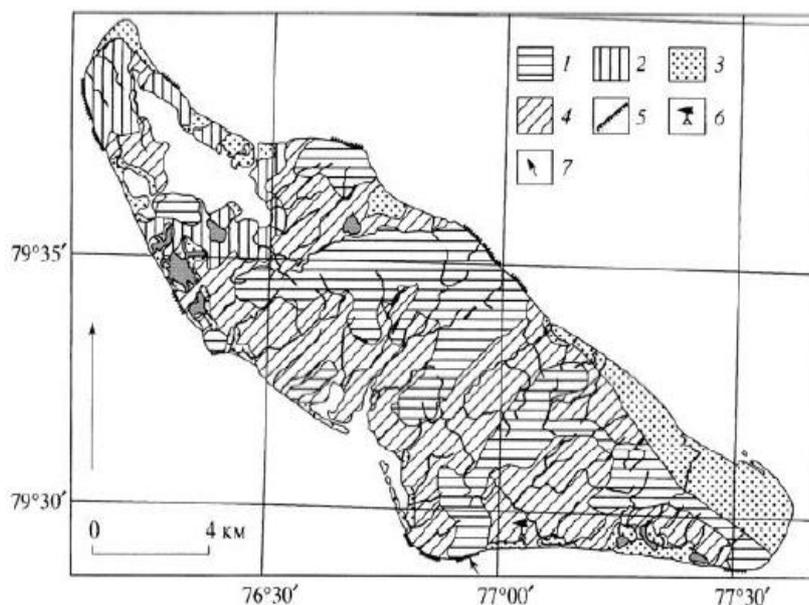


Рисунок 3.1. Геоморфологическая схема острова Визе (Романенко, 2008), 1 – пологоувалистая цокольная равнина высотой 10–22 м; 2 – цокольная морская терраса высотой 4–8 м; 3 – современная морская терраса высотой до 3 м; 4 – склоны, преимущественно делювиально-солифлюкционные; 5 – обрывы; 6 – полярная станция; 7 – участок стационарных наблюдений зимовщиков за разрушением берега

зону динамическое, термическое и химическое воздействия (*Соломатин, 1998*).

Современная аккумулятивная морская терраса высотой до 3 м окаймляет остров в большей части узкой полосой, но наиболее широкий участок расположен в восточной части. Она формируется в виде песчаных кос и пересыпей (*Романенко, 2008*). В противопоставлении разрушению коренных берегов отмечается отчетливый рост кос относительно их состояния на 1957 год (по топографической карте) от 2 до 3,5 км (*Балдина и др., 2022*). Морские льды при торошении перемещают донный и пляжевый обломочный материал к берегу, формируя валы, углубления, борозды. Кроме того, местами они выносят с пляжей и осушек сортированный обломочный материал, создавая тем самым дефицит песчаного материала (*Соломатин, 1998*). Также для острова характерны довольно крупные долины рек, много ручьев и распадков, к которым приурочены бугры пучения, часто каменистые, лишенные растительности (*Сафронова, Ходачек, 1989*).

Климат. Климат района – арктический морской, с низкой температурой воздуха, большой влажностью и облачностью, малым количеством осадков, частыми туманами летом, штормами и метелями зимой. Основной климатообразующий фактор – Северный Ледовитый океан и периодически проходящие атлантические циклоны (*Ромащенко и др., 2013*).

Погодные условия ежедневно фиксируются сотрудниками полярной гидрометеорологической станции, которая была основана в 1945 г. Средняя многолетняя температура воздуха равна $-13,6^{\circ}\text{C}$. Июль – самый теплый месяц (с самой высокой средней максимальной $+1,7^{\circ}\text{C}$ и средней минимальной $+0,5^{\circ}\text{C}$ температурой). Самый холодный месяц (с самой низкой средней мин. температурой) – февраль -29°C . Абсолютный минимум температуры равен $52,0^{\circ}\text{C}$ (*Северное УГМС*).

Средняя многолетняя относительная влажность воздуха 90%. В районе станции за год выпадает около 250 мм осадков. Снежный покров на о. Визе

сохраняется на протяжении 9-10 месяцев, в холодные годы снежники лежат все лето. Преобладает юго-восточное направление ветра со среднегодовой скоростью 6,4 м/сек. Устойчивый снежный покров образуется в середине сентября, окончательное его таяние происходит в конце июня. Однако снегопады случаются и летом. Лето короткое и холодное (*Северное УГМС*). Наибольшие скорости ветра наблюдаются в холодный период, бывают и ураганы со скоростью 40 м/с и более. Часты метели, даже летом (*ВНИИГМИ-МЦД*).

С ноября по май окружающая остров акватория покрыта льдами, максимальная толщина которых достигает 1,5–2,0 м. Зимой вблизи побережий образуется припай; на остальной части акватории – дрейфующий лёд.

Растительность. С геоботанической точки зрения остров Визе изучен крайне слабо. Нет привязки к территориям исследования, что может говорить о неполноте флористического описания территории, а характеристику произрастания отдельных ассоциаций можно получить лишь по общим описаниям арктической флоры, а также по фотографиям (*Сафронова, Ходачек, 1989*). Так как остров находится в зоне арктических пустынь согласно геоботаническому районированию Арктики, можно предположить, что растительность на острове почти отсутствует. Господствуют разнотравные лишайниковые полигональные тундры, широко распространена подушковидная форма роста цветковых растений. Покров в сообществах разреженный пятнистый: местами произрастает ягель, встречаются отдельные кочки, покрытые лишайниками, немного цветов. По склонам увалов в разреженных сообществах наряду с лишайниками участвуют мхи, а среди цветковых растений – злак фиппсия холодная. Здесь распространены разнотравные мохово-лишайниковые и фипсиено-разнотравные мохово-лишайниковые мелкополигональные бугорковатые тундры.

На щебнистых почвах (как на вершинах, так и на склонах увалов) развиты крайне разреженные разнотравно-лишайниковые полигональные тундры с доминированием мака полярного, разнотравные с обилием мака полярного, камнеломки дернистой, камнеломки супротивнолистной и разнотравно-ивковые полигональные с обилием мака полярного, камнеломки дернистой. Для местообитаний с поздним таянием снега характерны фиписевые – фиписия холодная, фиписевые моховые группировки.

Общие сведения из картографических источников. Из тематических карт острова Визе доступны только мелкомасштабные – Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (рис. 3.2), Атлас Арктики 1985 года. Контура на них генерализованы в соответствии с требованием к масштабу, что позволяет получить лишь общую информацию и основные очертания.

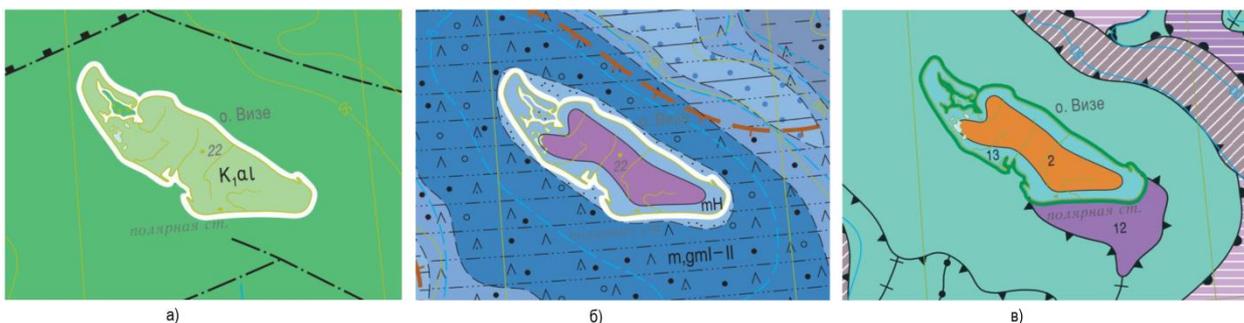


Рисунок 3.2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000, лист T-41-44: а) фрагмент геологической карты дочетвертичных отложений и полезных ископаемых; б) фрагмент геологической карты четвертичных отложений, где фиолетовый – дочетвертичные образования; в) фрагмент геоморфологической карты, где 2 – денудационные склоны гор и предгорий миоцен-голоценового возраста, 13 – абразионно-аккумулятивные морские террасы на высотах от 6 до 60 м голоценового возраста

Карта наиболее крупного масштаба на территорию острова Визе среди общедоступных – топографическая карта масштаба 1:200 000, составленная в 1957 году. Номенклатурный лист T-43-IV, V, VI, сечение рельефа 20 м (при максимальной абсолютной высоте 22 м) со скудным отображением ситуации (рис. 3.3). Эта же топографическая карта без изменений была оцифрована и опубликована в единой электронной картографической основе (ЕЭКО) (<https://cgkipd.ru/CECD/>).

Координаты
местоположения острова
Визе $79^{\circ} 30' - 79^{\circ} 40'$ с. ш. и
 $76^{\circ} - 77^{\circ}$ в. д. Максимальная
высота – 22 м. Площадь
острова в период его
открытия и на основе
вычислений, выполненных
по границам с
топографической карты –
 288 км^2 . Однако в последние
годы из-за размывания



Рисунок 3.3. Фрагмент топографической карты
о. Визе 1957 г.

берегов, площадь острова значительно изменилась и по данным 2019 года составляет $250,9 \text{ км}^2$. Простирающийся с востока-юго-востока на запад-северо-запад на 22,5 км остров имеет ширину 5,5 км (Балдина и др., 2022).

Крайние точки низменного южного берега выступают в море в виде мысов. Восточный мыс находится в 10 км от полярной станции, а в 2 км западный (поворотный), на котором установлен навигационный знак. Со всех сторон остров Визе окаймлен береговым валом из камней и мелкой гальки, ширина которого от 7 до 30 м. Вал неоднороден по своему составу: местами это просто насыпь, местами представляет собой отдельные нагромождения гальки на различном расстоянии от уреза воды по данным первооткрывателей (Визе, 1939, 1948).

Современное состояние. Некоторые строения станции, существующей с 1945 года на южном берегу острова, возведённые примерно в 100 м от берега, к 2010 г. уже практически уничтожены вследствие отступления берегов. В 2011 г. «Михаил Сомов» во время снабженческого рейса доставил на остров конструкции нового здания метеостанции, которое построили вдали от берегового уступа.

Коллективом Географического факультета МГУ им М.В. Ломоносова был выполнен цикл работ по дешифрированию положения береговой линии на разновременных снимках с 1986 по 2019 г. о. Визе и о. Ушакова (*Балдина и др., 2022*). Было установлено, что скорость размыва берегов оказывается наибольшей от 6,5 до 10,9 м/год на юго-западной стороне острова, начиная с 2008 г. При этом отчетливо выросли косы благодаря полному отсутствию льда. Отмель у выхода из большой лагуны приросла на 80 м в 1999–2009 гг. и еще на 160–190 м за следующие 10 лет. Их рост относительно положения на топографической карте 1957 г. достиг 3,5 км. Северная часть косы искривляется, приближаясь к берегу, а южная часть почти исчезает. По непосредственным наблюдениям зимовщиков полярной станции (*Романенко, 2008*), скорость отступления южного берега в 1950–1958 гг. колебалась от 0,46 до 7,2 м/год, а по результатам дешифрирования разновременных снимков 1984–2021 гг. составляла в среднем 1,5–1,6 м/год (*Балдина и др., 2022*).

Наличие дистанционной информации в оптическом диапазоне на исследуемую территорию ограничено. За всё время существования миссии Landsat с 1972 г. безоблачные снимки были получены в 1986, 1993, 1999, 2008, 2010 и 2019 годы (*Балдина и др., 2022*). Также существует высокодетальная открытая оптическая подложка из материалов космических съемок высокого пространственного разрешения, доступных через ESRI World Imagery. Несмотря на высокое разрешение этих снимков существует большой недостаток – во-первых, оперативность их опубликования в открытых источниках может занимать годы (данные 2019 года опубликованы летом 2022 года), во-вторых, съемки разных участков не единовременны, а изображение арктических островов зачастую оказываются сшиты из снимков разных лет и/или сезонов. Появление в открытом доступе информации с оптико-электронного спутника Sentinel-2 (рис. 3.4) позволило получать данные 10-метрового пространственного разрешения, однако в условиях частой облачности в высоких широтах, их тоже немного.



Рисунок 3.4. о. Визе на оптическом снимке Sentinel-2 (21 августа 2019 г.)

Населенных пунктов на острове нет, завоз необходимых продуктов осуществляется в период навигации судном, при помощи вертолета (*Северное УГМС*). Приведенные выше сведения складываются из отдельных редких посещений специалистами острова Визе и дают представление о слабой изученности физико-географических особенностей территории.

Заметное увеличение среднегодовой температуры воздуха в Арктике приводит к увеличению периода открытой воды, разрушению берегов и появлению обширных отмелей, изменениям ландшафтов за счет таяния подземных льдов и «позеленения тундры» (*Алексеев, 2013; Огородов и др., 2022; Тишков и др., 2015*). В большей степени эти факторы оказывают влияние на небольшие арктические острова, которые ранее были окружены мощными ледовыми полями значительную часть года. Ввиду малого размера и суровых природных условий такие острова малоизучены и слабо представлены на тематических картах, а топографические не обновлялись с 50-х гг. прошлого века. Организация и проведение полевых исследований

труднодоступных отдаленных арктических территорий, какими являются малые арктические острова, крайне проблематичны и ресурсоемки вследствие их физико-географических условий. В особенности это относится к островам морей, омывающих берега Сибири. Тем не менее, в августе-сентябре 2019 года в ходе уникальной комплексной экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики. Северная Земля – 2019» на базе научно-экспедиционного судна «Профессор Молчанов» проведены натурные обследования части таких островов, выполнены их беспилотные съемки с квадрокоптеров. Однако они не закрывают вопрос актуализации информации обо всех островах в течение года.

В ходе упомянутой экспедиции проводились наблюдения и о. Визе. Однако в 2019 году наблюдения за островом велись с судна из-за невозможности высадки на сушу, а в 2021 г. они охватили и берега. В предшествующие годы до конца XX века производились описания строения рельефа и рыхлых отложений островов Карского моря. Велись они раньше лишь во время немногочисленных и непродолжительных посещений в 1930–50-х гг. Очевидно, что количество научных трудов по данным территориям невелико (*Романенко, 1998*), а более поздние работы составлялись и систематизировались на базе более ранних. Также помимо отдельных описаний, выполненных специалистами географами и геологами, информация может извлекаться из комплексных источников и из рассказов очевидцев.

Задача картографирования современного состояния ландшафтов таких островов и отслеживания их сезонной изменчивости актуальна, так как обеспечивает основу для прослеживания многолетней динамики, обусловленной изменениями климата. Так, на о. Визе повышение температуры за последние 10 лет составляет 1,5 °С (*Степина, Подрезова, 2023*), что приводит к неизбежным изменениям в природно-территориальных комплексах. Одним из новых методов определения качественных изменений поверхностей является использование мультивременного композита с

когерентностью (МТС). Наличие действующей метеорологической станции на о. Визе и возможность получения актуальной метеорологической информации на моменты радиолокационных съемок, необходимой для определения состояния поверхности, обуславливает выбор этого острова с целью отработки интерпретации МТС для территории малых арктических островов.

3.2 Материалы для исследования и методы их обработки⁴

Методика применения мультивременного композита с когерентностью (МТС) для мониторинга и картографирования малых арктических островов на примере о. Визе состоит из нескольких этапов:

- создание базы радиолокационных снимков на изучаемую территорию;
- расчет значений когерентности для всех возможных пар снимков и последующий анализ изображений когерентности с учетом метеорологической информации;
- формирование мультивременных композитов с когерентностью (МТС) и анализ по ним сезонных изменений поверхности;
- оценка влияния метеорологических параметров на когерентность снимков;
- дешифрирование природно-территориальных единиц по МТС.

Для формирования изображений интерферометрической когерентности и затем мультивременного композита (МТС) для поверхности острова Визе были использованы комплексные радиолокационные данные С-диапазона спутника Sentinel-1В с согласованной горизонтальной поляризацией (табл. 3-1.).

⁴ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Ширишова В.Ю., Балдина Е.А. Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — №4. — С. 79-91.

Таблица 3-1. Характеристики выбранных данных

Режим съемки	интерферометрический широкозахватный – IW – Interferometric Wide Swath,
Уровень обработки	комплексные радиолокационные данные – SLC – Single Look Complex
Пространственный охват, км	250
Размер пиксела, м	5x20
Поляризация	Согласованная горизонтальная (ГГ – НН)
Полосы (swath)	IW2
Подполосы (bursts)	3-4
Номер витка	137
Направление орбиты	Нисходящая
Базовая линия, м	До 200

Количество РЛИ почти за 6 лет активного существования спутника Sentinel-1В (с декабря 2021 года по официальному заявлению ЕКА спутник вышел из строя) составило 121 изображение и, соблюдая минимальную временную декорреляцию в 12 дней, из них было сформировано 84 изображения когерентности. В таблице приведено количество снимков за каждый год радиолокационной съёмки (табл. 3-2).

Таблица 3-2. Использованные в работе радиолокационные изображения

Год съемки	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Количество снимков	9	6	23	29	28	26

Обработка для получения МТС-изображений выполнялась в программном обеспечении SNAP и включала в себя ряд стандартных процедур (рис. 3.5).

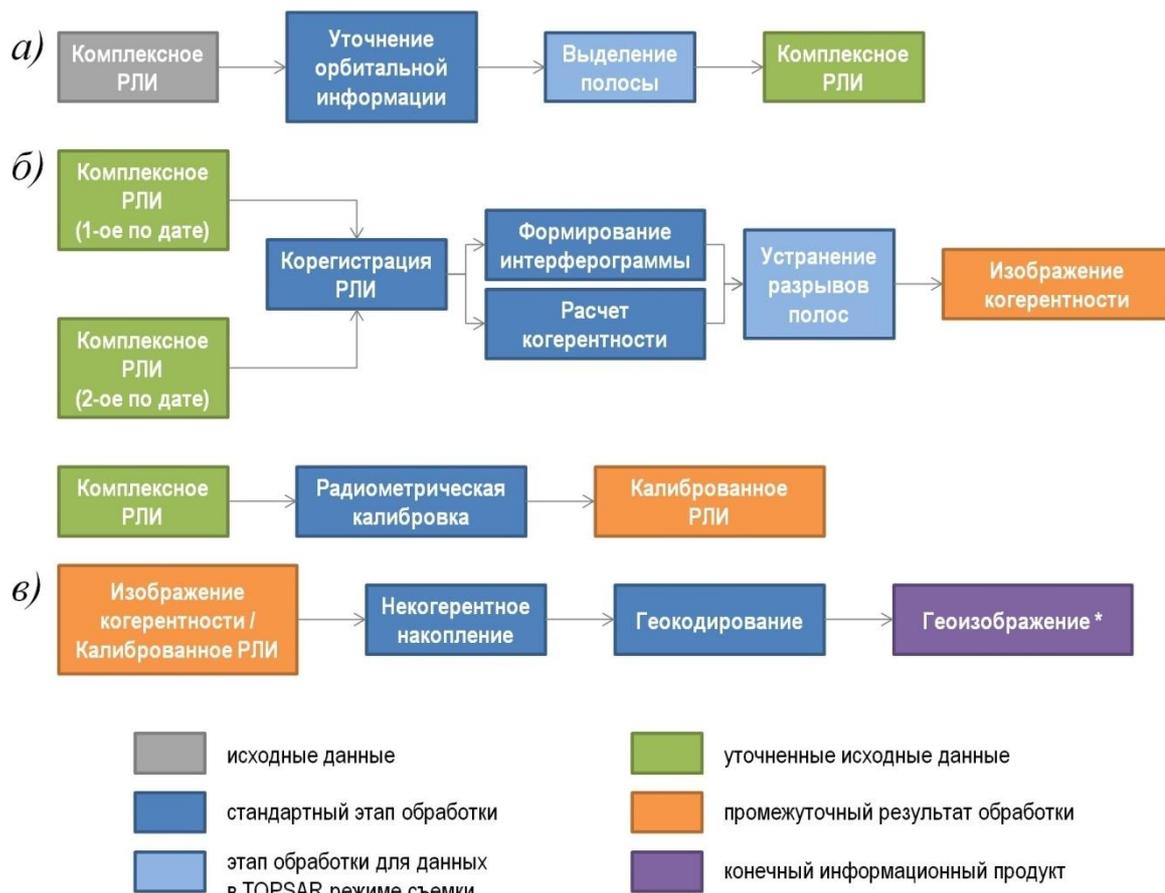


Рисунок 3.5. Этапы обработки РЛИ: а) предобработка РЛИ; б) формирование радиолокационных информационных продуктов: из пары РЛИ – изображения когерентности, из одного РЛИ – радиометрически калиброванного РЛИ; в) создание геоизображения

Предобработка РЛИ. Для уточнения орбитальной информации Sentinel-1 применены файлы точных орбит, программно сформированные и подгруженные из хранилища GNSS Hub. Остров Визе располагается в данной геометрии снимка на 2 интерферометрической полосе (IW2) и подполосах 3–4 (bursts 3-4), что позволяет его выделить и оптимизировать последующие шаги обработки.

Формирование радиолокационных информационных продуктов. Выполняются классические шаги обработки, подробно рассмотренные в разделе 1.2. Так как территория относится к арктической зоне, была применена ЦМР – GETASSE30 – мозаика, созданная на основе: SRTM30, ACE1, Mean Sea Surface (MSS), EGM96 ellipsoid, с пространственным разрешением 1 км. Для совмещения изображений такой детальности было достаточно. Для расчета когерентности оптимальными параметрами окна

расчета по наклонной дальности и азимуту является окно 1x1, сохраняющее разрешение исходных РЛИ. Радиометрическая калибровка для приведения к безразмерным значениям удельной эффективной площадью рассеяния (УЭПР) выполнялась до физических единиц уровня отраженного сигнала в децибелах (дБ).

Создание геоизображений. Процедура некогерентного накопления, позволяющая перейти к квадратному размеру пиксела, выполнялась с коэффициентами 4 по дальности и 1 по азимуту. Таким образом, пространственное разрешение изображений было приведено к 14 м. Так как остров Визе преимущественно равнинный, то выполнена коррекция по эллипсоиду WGS84 с переводом в стереографическую полярную проекцию – EPSG:5940 (полярная стереографическая проекция для России) и выполнением орторектификации по ЦМР – GETASSE30.

Итак, были сформированы геоизображения: 84 изображения когерентности, 168 калиброванных РЛИ.

Формирование мультивременных композитов с когерентностью. Мультивременной композит с когерентностью представляет собой цветное изображение, составленное из двух амплитудных радиолокационных изображений, полученных с интервалом 12 дней в одинаковой геометрии съемки, и изображения когерентности, сформированного по этим же исходным снимкам (рис. 3.6).

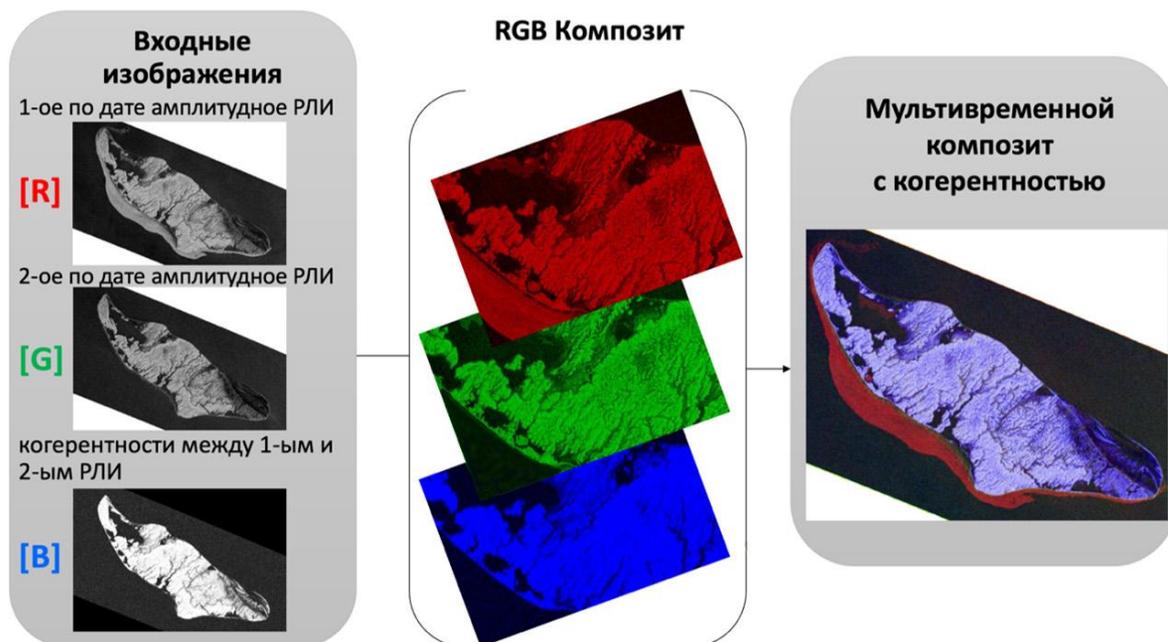


Рисунок 3.6. Формирование МТС-композиита

Составляется МТС следующим образом:

- в красном канале – амплитуда первого по дате радарного снимка;
- в зеленом канале – амплитуда второго по дате радарного снимка;
- в синем канале – когерентность фаз этих двух радарных снимков.

3.3 МТС в мониторинге сезонных изменений на примере острова Визе⁵

Анализ изображений когерентности с учетом метеорологической информации

За 2019 год РЛИ с Sentinel-1В были получены за каждые 12 дней, что позволило рассчитать значения когерентности, а затем сформировать изображения МТС на весь год (рис. 3-7). При сравнении этих изображений можно отметить, что более высокие значения когерентности, соответствующие наиболее «стабильному» состоянию поверхности острова, отмечаются зимой и летом.

⁵ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Ширишова В.Ю., Балдина Е.А. Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — №4. — С. 79-91.

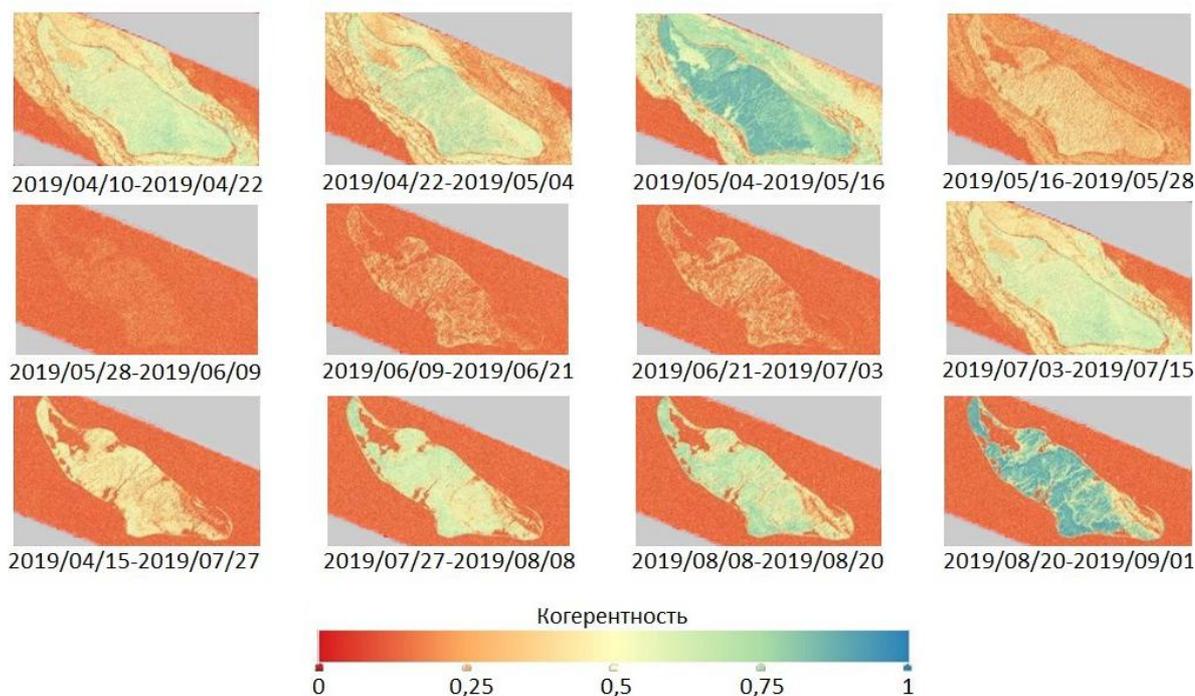


Рисунок 3.7. Изображения когерентности для нескольких пар данных съемок за «теплый период» 2019 г. (Ширшова и др., 2021)

Сопоставление этих изображений когерентности с метеорологическими параметрами за 2019 год: количеством осадков, температурой воздуха, высотой снежного покрова и видимостью и их совместный анализ позволяет выявить влияние погодных условий на изменение состояния поверхности острова (рис. 3-8) (Baldina et al., 2020). В результате оказалось возможным разделить состояния поверхности острова, характеризуемые величиной когерентности за 12 суток, наблюдаемые в течение года, на шесть наиболее характерных периодов, соответствующих определенным метеоусловиям и их изменениям. Они включают:

1 – значения когерентности относительно высокие за счет стабильной высоты снежного покрова, некоторое уменьшение ее значений связано с колебаниями температуры воздуха;

2 – высокие значения когерентности наблюдаются в условиях практически полного отсутствия изменения высоты снежного покрова при постепенном росте температуры;

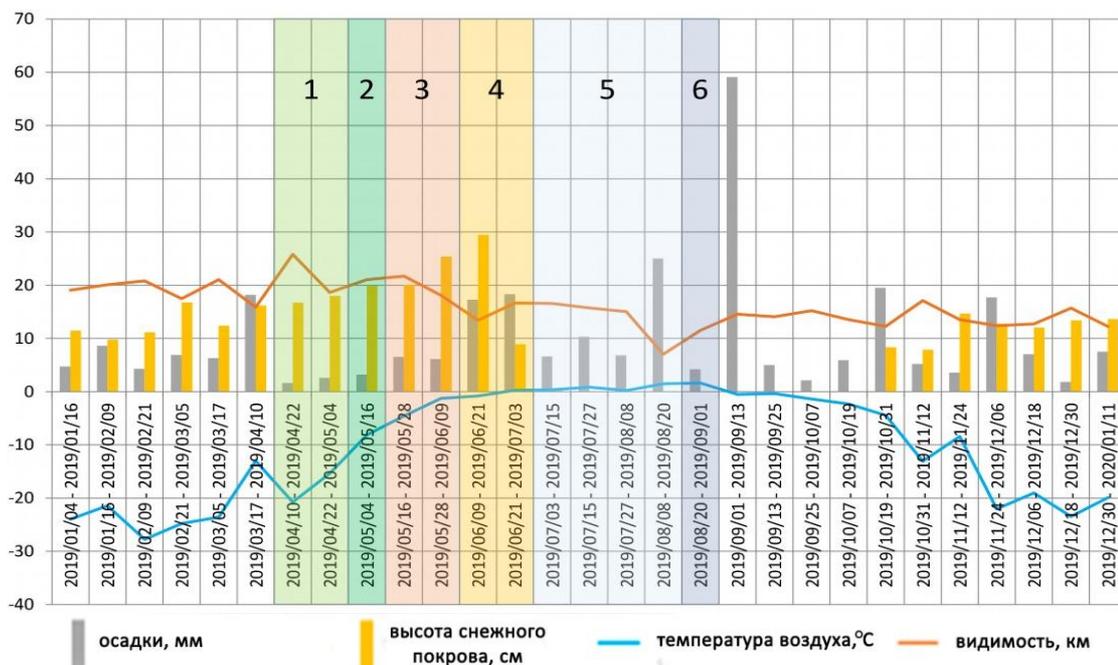


Рисунок 3-8. Осредненные метеорологические показатели за 2019 год. Цифрами 1-6 и разными цветами обозначены наиболее характерные периоды изменения погоды и их влияния на величину когерентности – пояснено в тексте (обработка метеоданных выполнена Е.Ю. Ждановой) (Baldina et al., 2020)

3 – наиболее низкие значения когерентности наблюдаются при неизменной высоте снежного покрова в сочетании с переходом к положительным температурам воздуха, ведущим к изменению свойств поверхности снега;

4 – значения когерентности заметно снижаются в период снеготаяния и роста температуры воздуха в сочетании с периодическими снегопадами, приводящими к увеличению высоты свежего снежного покрова;

5 – после схода снежного покрова состояние поверхности меняется слабо, что дает стабильно высокие значения когерентности, небольшое снижение дает выпадение осадков между съемками;

6 – высокие значения когерентности, обусловлены стабильным состоянием поверхности при почти полном отсутствии осадков за этот период на фоне максимальных за год температур воздуха.

Анализ цветных изображений МТС

На 2019 год для острова Визе было сгенерировано 26 синтезированных МТС (рис. 3.9). Интерпретация цветов для арктических территорий

определяется на основе физико-географических свойств местности и при анализе метеорологической информации.

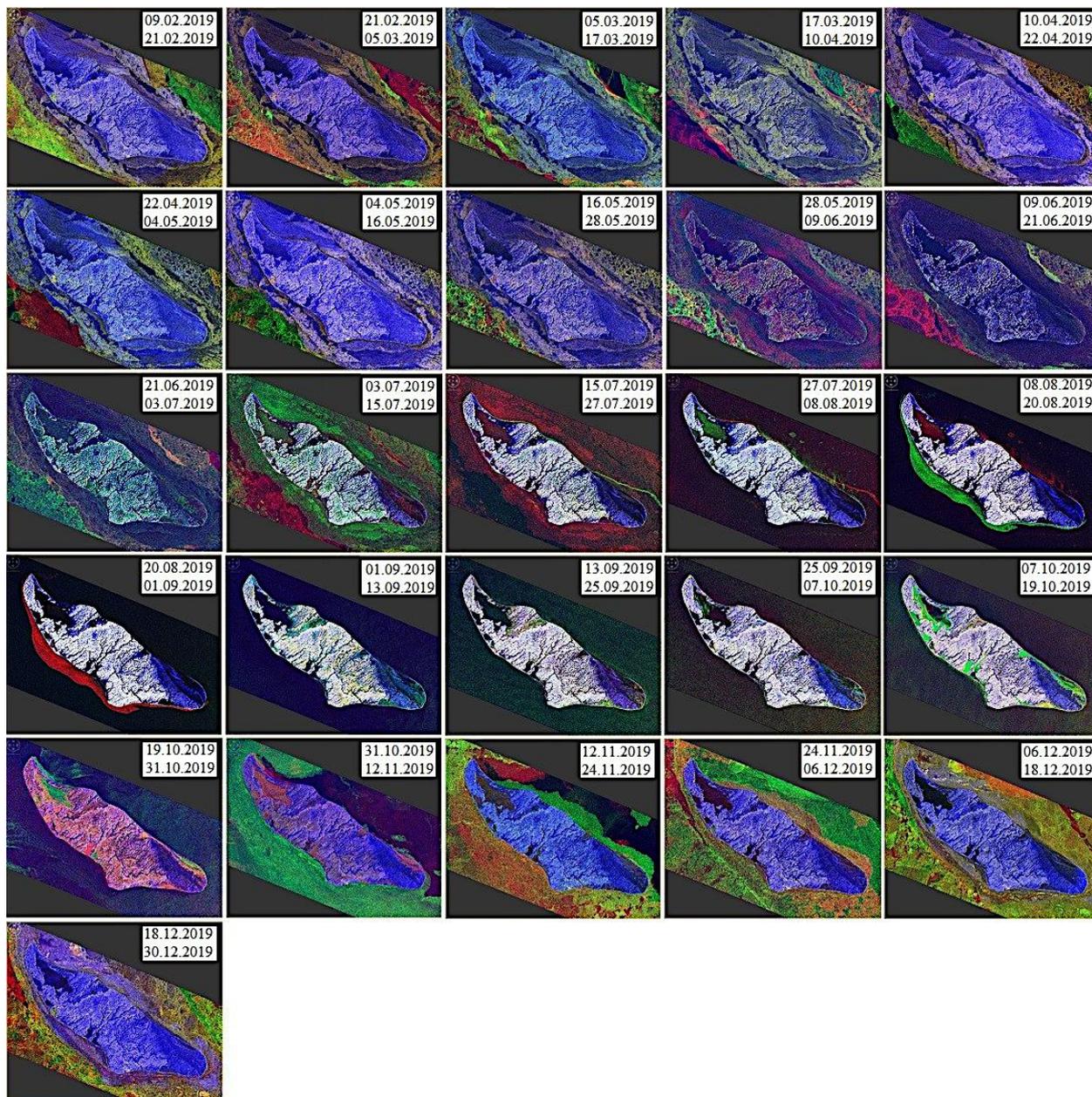


Рисунок 3.9. МТС-композицы за 2019 год

Анализ МТС, характеризующих состояние поверхности острова и прилегающей акватории за весь 2019 год показал, что период с ноября по апрель можно условно назвать «зима», когда сохраняется устойчивое заснеженное состояние поверхности, а с августа по сентябрь – «лето», когда заметно отсутствие снежного покрова. Промежуточные периоды характеризуются значительной неустойчивостью (постепенное таяние снега или его установление при колебаниях температуры воздуха). В целом, для

длительного периода зимы характерны высокие значения когерентности. В летний период высокие значения когерентности для 12 суточных интервалов являлась, скорее, редким состоянием, тем самым сужая выборку данных для картографирования.

Характеристика сезонных изменений о. Визе по МТС

Для весеннего времени характерны преимущественно фиолетовые оттенки поверхности острова. Синие и белые оттенки, наблюдаемые на композите, свидетельствуют об отсутствии изменений в диапазоне дат композита. В акватории наблюдается движение льдов и как будто послойное освобождение берегов от них (рис. 3.10 а).

В летнее время красный цвет льдов акватории отражает отдаление льдов от берегов острова, зеленый – наращивание льда. От белого до темно-синих цветов – поверхность острова находится в практически стабильном состоянии. Вкрапления зеленого цвета характеризуют недавно выпавшие осадки (рис. 3.10 б).

Также для лета характерны преимущественно белый цвет острова в повышенной его части и синий в низменной, говоря о стабильной и свободной от снега поверхности острова и льда в акваториях в диапазон дат композита. Речные русла также свободны ото льда и снега, отлично видна их структура и открывается сильная расчлененность рельефа острова. Сама акватория, свободная ото льда, – в темно-синих цветах (рис. 3.10 в).

В осеннее время поверхность острова выходит из стабильного состояния ввиду влияния осадков, ветра, изменения температур. На композите это отражается в фиолетово-розовых оттенках на всей поверхности, жёлтыми оттенками выделяются участки – недавно выпавших осадков. В акватории наблюдается наращивание льда, отображающееся зеленым цветом (рис. 3.10 г).

В зимнее время поверхность острова вновь находится в стабильном состоянии, однако она заснежена и покрыта льдом. Такое состояние выражается в синих оттенках композита. Лед, примыкающий к берегам

острова, тоже становится стабильным и отображается такими же синими цветами на композите. В акватории наблюдается периодическое движение льда, о чем свидетельствует включение то желтого, то красного цвета (рис. 3.10 д).

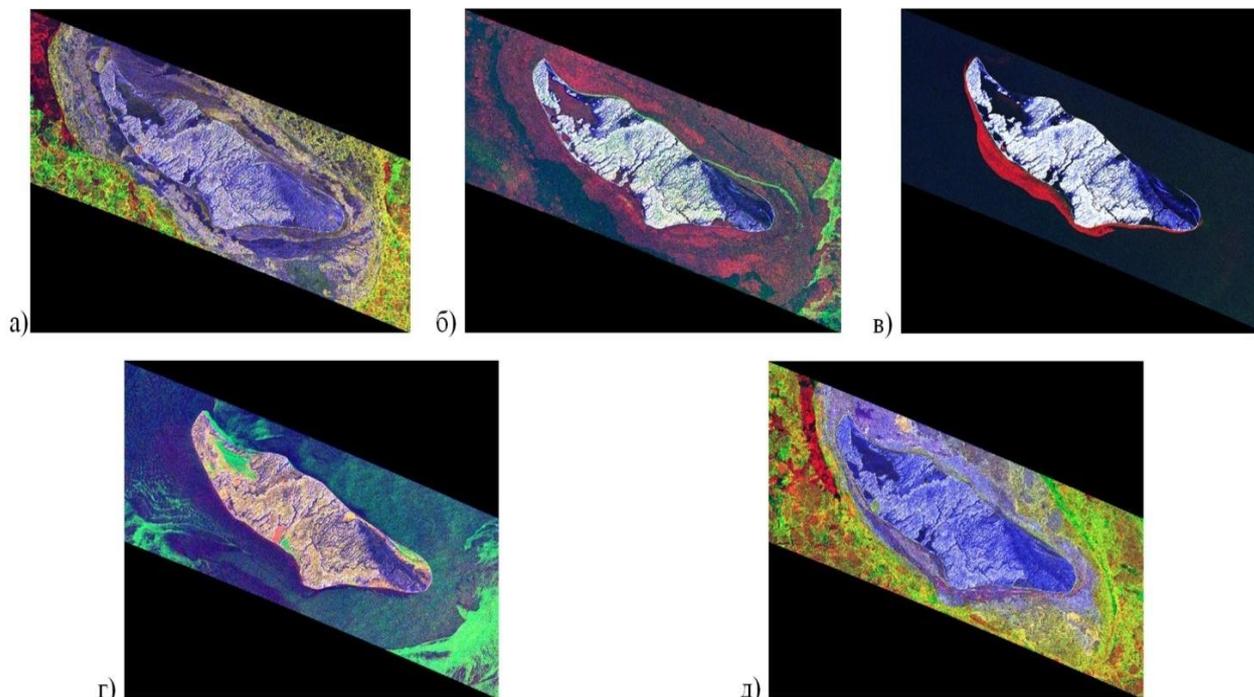


Рисунок 3.10. Выборочные сезонные мультивременные композиты 2019 года: а) весна, композит: 16.05.2019-28.05.2019; б) лето, композит: 03.07.2019-15.07.2019; в) лето, композит: 08.08.2019-08.08.2019; г) осень, композит: 25.09.2019-07.10.2019; д) зима, композит: 24.11.2019-06.12.2019

На всех изображениях отчетливо выделяется юго-восточная часть острова – участок современной морской террасы (Романенко, 2008), для которой характерны темно-синие цвета на протяжении всего года. В летний период этот контраст особенно заметен. Такой цвет обусловлен малыми значениями амплитуд обоих снимков и высокими значениями когерентности. Этот участок характеризуется отсутствием какого-либо растительного покрова и имеет низкую шероховатость, что и обеспечивает малые амплитуды сигнала. В период между радарными съемками равнинная территория оставалась без изменений. Чем темнее оттенок синего, тем меньше шероховатость поверхности, указывающая на относительно плоскую и равнинную местность.

Анализ нескольких различных по ландшафту участков местности о. Визе (рис. 3.11.1) на разносезонных МТС (рис. 3.11.2) позволил выделить закономерности отображения разных типов местности при учете метеорологических факторов.



Рисунок 3.11.1. Участки о.Визе

Синий цвет характерен в течение года для всех поверхностей, имеющих низкую шероховатость, из-за слагающего ее плотного дисперсного грунта (рис. 3.11.2 а). В зависимости от выпадения осадков между съемками значения когерентности меняются, что выражается в разных оттенках синего цвета на зимних композитах. Плоские приводораздельные поверхности, покрытые сухим снегом зимой, представляющие собой так же слабо шероховатую структуру, отображаются в синих цветах. С ноября по май реки острова покрыты льдом, и отчетливо видны только днища долин и термоэрозионные промоины в пределах плоской приводораздельной поверхности также синего цвета (рис. 3.11.2 участок 1). Летом же, с конца июня по конец августа, когда поверхность свободна от снега, особенно

темным синим цветом выделяются подтапливаемые участки суши, лишенные растительности (рис. 3.11.2 в: участок 3, 4).

Летом приводораздельные поверхности, лишенные снега, покрыты незначительной растительностью, которая дает объемное рассеивание сигнала и как следствие высокие значения амплитуд: при отсутствии осадков и перепадов температур за интервал между съёмками, получаются высокие значения когерентности, что на МТС выражается в белом цвете этих участков. Такое состояние встречается только в летний период, когда достигается минимум осадков и поверхность острова свободна от снега (рис. 3.11.2 в: участок 1, 2).

Розовый цвет приводораздельные поверхности приобретают в осеннее время на короткое время, что объясняется выпадающими осадками в сочетании с резким наступлением отрицательных температур (рис. 3.11.2 г). Противоположная ситуация наблюдается весной – цвет приводораздельных поверхностей меняется на фиолетовый, который обусловлен слабо выраженными процессами таяния снега (рис. 3.11.2 б). Увлажненные поверхности, в одну из дат съёмок, дают повышенное отражение сигнала и это приводит к различиям в значениях двух амплитуд МТС. Такие же процессы наблюдаются в днищах долин, но из-за их слабой шероховатости они отображаются более темными оттенками фиолетового.

Жёлтый цвет распространен в начале лета преимущественно на участках делювиально-солифлюкционных склонов, с появлением редкой растительности, что приводит к увеличению яркости (значений амплитуды) в один из сроков. В осеннее время – с конца сентября по середину октября – жёлтый цвет также характерен для приводораздельной поверхности в результате выпадения осадков и соответствует участкам местности в разной степени подверженным увлажнению (рис. 3.11.2 г).

Зелёный цвет встречается также в начале лета на приводораздельных участках из-за увеличения растительной массы и соответственно

шероховатости поверхности (рис. 3.11.2 в: участок 1, 2). Появившаяся полоса льда также отображается ярким зеленым цветом (рис. 3.11.2 в: участок 3, 4).

Жёлтый и зеленый цвета заметны в пределах современной морской террасы и пляжей в осеннее время. В конце августа, начале сентября фиксируются максимальные значения температуры и осадков.

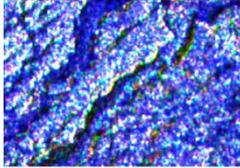
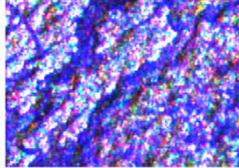
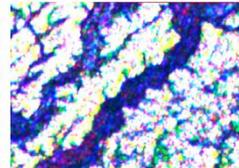
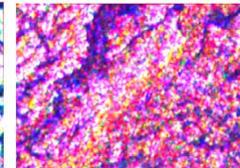
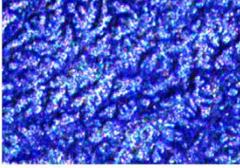
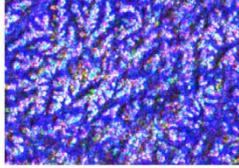
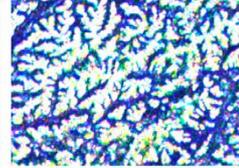
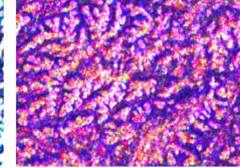
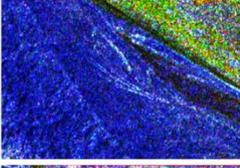
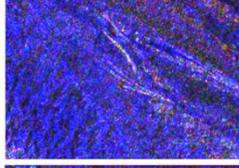
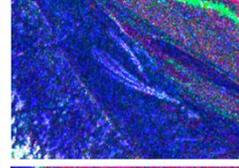
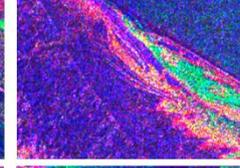
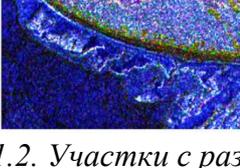
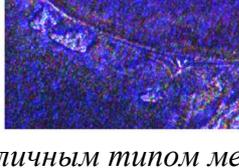
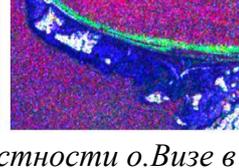
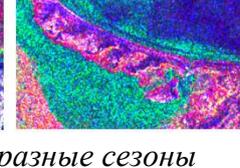
	Период съемки в 2019 году			
	а) 24 ноября – 6 декабря	б) 16 мая – 28 мая	в) 3 июля – 15 июля	г) 25 сентября – 7 октября
характеристика погоды за период между съемками	Температура стабильно в районе -20°C, максимальная за год	Перепад температур от отрицательных к положительным, небольшая высота снежного покрова и умеренное количество осадков.	Температура стабильно около 0°C, отсутствие снежного покрова и большое количество осадков.	Перепад температур от положительных к отрицательным, отсутствие снежного покрова и небольшое количество осадков.
Участки с разными типами местности				
1. Плоские приводораздельные участки и речные долины				
2. Равнина с эрозионным расчленением				
3. Современная морская терраса, пляж				
4. Намывная коса				

Рисунок 3.11.2. Участки с различным типом местности о. Визе в разные сезоны

Для арктического региона цвета, получаемые на сезонных композитах, отличаются в зависимости от времени года и соответствуют разным объектам. Всесезонно цвета одинаковы только для инфраструктурных (металлических) объектов (рис. 3.12). На о. Визе стабильный во все сезоны белый цвет с ярко-желтыми вкраплениями преимущественно характерен для метеорологической станции и построек, окруженных большим количеством металлических бочек: для антропогенных объектов характерны высокие значения амплитуды и высокая когерентность. По высокой яркости

отображаются также участки кос и побережья, сложенные крупнообломочным материалом.

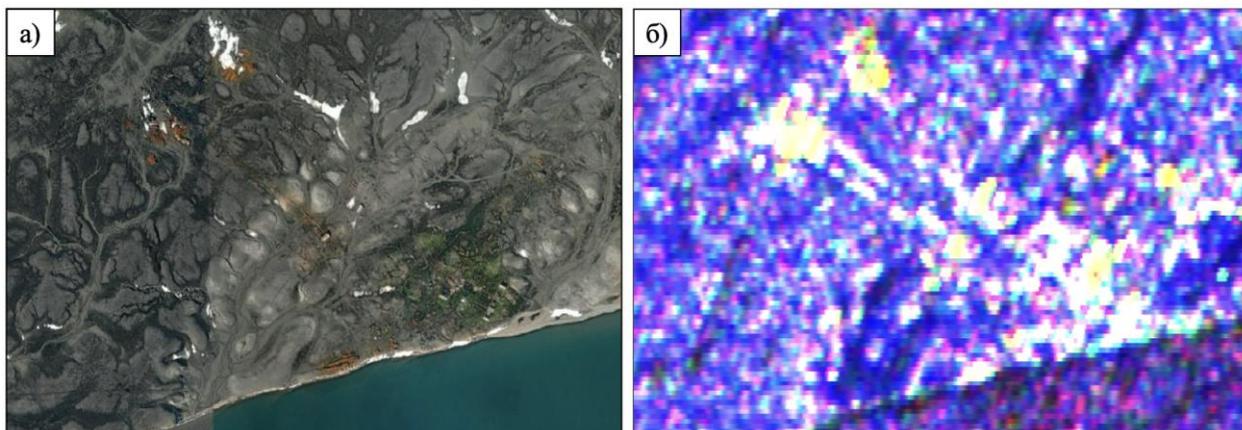


Рисунок 3.12. Антропогенные объекты: а) (выделены рамкой) на МТС-композиатах 2019 года

Устойчивое отображение металлических объектов на разносезонных МТС подтверждает возможность их обнаружения в любое время года.

Итак, для арктических территорий цветовая гамма снимков различается по сезонам. Проведенное выше сопоставление с метеорологическими данными (см. рис. 3.8) и имеющимися сведениями о местности позволяет сделать вывод о соответствии самых распространенных цветов на композите определенным типам местности и различным состояниям объектов на поверхности острова (рис. 3.13).

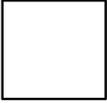
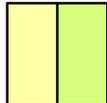
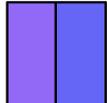
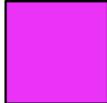
Цвет на МТС	Временной период	Дешифрируемые объекты	Формирование цвета МТС-композиита		
			[R] 1-ая по дате амплитуда	[G] 2-ая по дате амплитуда	[B] Значение когерентности
	С конца июня по конец августа	Плоские приводораздельные участки с редкой растительностью	Высокая	Высокая	Высокое
	С конца мая по конец июня	Днища долин	Средняя	Высокая, средняя	Средние
	С конца сентября по середину октября	Образование льда в лагунах; песчаные пляжи			
	С марта по конец мая	Плоские приводораздельные участки, днища долин	Низкая	Средняя	Средние
	С конца сентября по середину ноябрь	Плоские приводораздельные участки	Высокая	Низкая	Средние
	С конца июня по конец августа	Морские террасы	Низкая	Низкая	Средние
	С середины ноября по март	Плоские приводораздельные участки			
	Весь год	Термоэрозионные промоины			
	Весь год	Антропогенные объекты, каменистые гряды	Высокая, средняя	Высокая	Высокое

Рисунок 3.13. Интерпретация цветов на геоизображении МТС

Это дало возможность систематизировать цвета на геоизображении МТС, по аналогии с интерпретацией цветов, разработанной ранее для сельскохозяйственных территорий (Пиетранера и др., 2012, Приложение 3).

3.4 Летние МТС композиты для малых арктических островов

МТС композиты на летний период были сформированы также для отдельных малых арктических островов. Распределение цветов свидетельствует о схожих природно-территориальных комплексах этих островов, однако более детальная оценка может быть дана после дешифрирования каждого в отдельности. Так, на о. Малый Таймыр и о. Исаченко отчетливо видны термоэрозионные овраги и водотоки,

соответственно отобразилась сильная расчлененность этих островов (рис. 3.14).

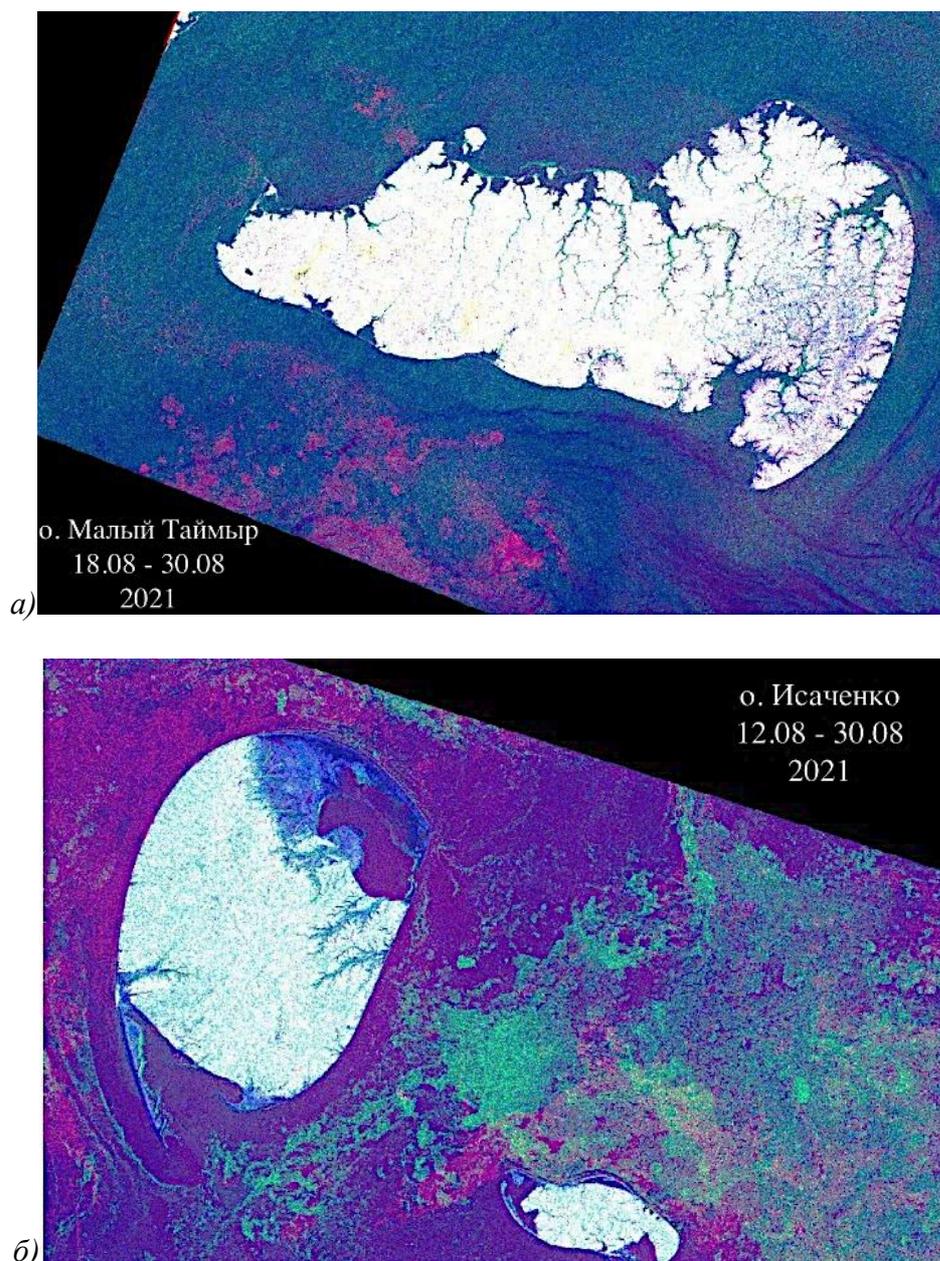


Рисунок 3.14. Летние МТС композиты: а) о. Малый Таймыр и б) о. Исаченко

Для о. Уединения характерны каменистые гряды, обрамляющие остров, имеющие желтый цвет (рис. 3.15).

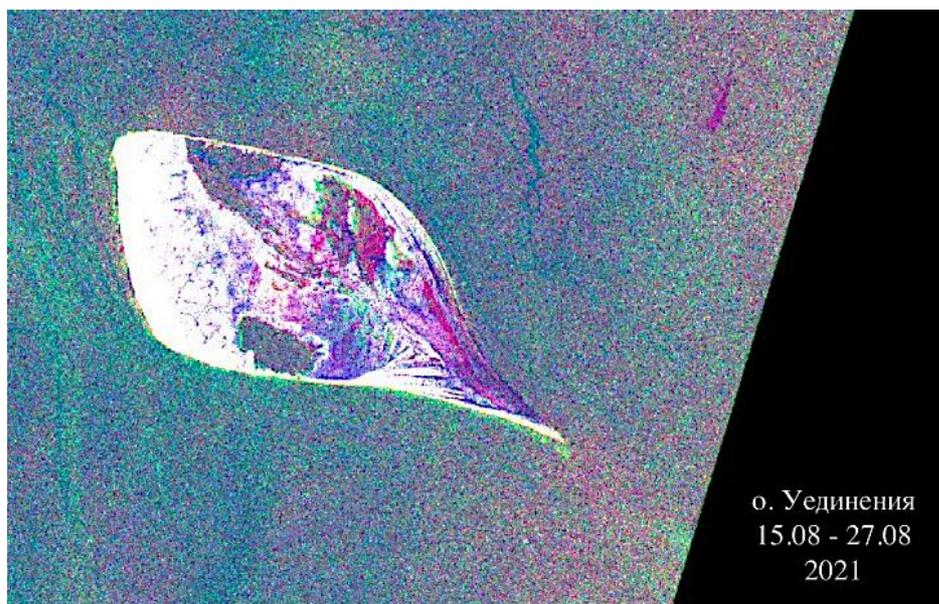


Рисунок 3.15. Летний МТС композит о. Уединения

Архипелаг Известий ЦИК (рис. 3.16) отличается наличием растительности, характерной для арктической тундры. Это отобразилось на МТС в виде вкраплениях желтых пикселей (отмечены на рисунке) на фоне белых, которые свидетельствуют о высоких значениях когерентности и низких значениях амплитуды, характерных для открытой поверхности, не покрытой растительностью.

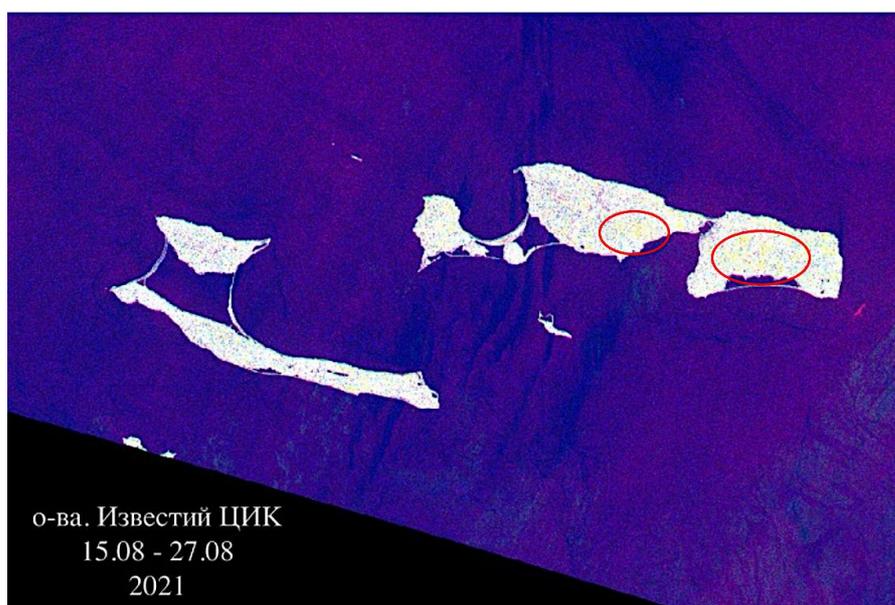


Рисунок 3.16. Летний МТС композит Арх. Известий ЦИК. Красным контуром отмечены участки с растительностью

На о. Самойловича заметно влияние изменения погодных условий между моментами съемки — выпадение осадков или действия ветра (рис.

3.17). Это явление отобразилось в преимущественно розовых цветах на изображении, что обусловлено сочетанием низких значений когерентности и низких значений амплитуды во второй срок.

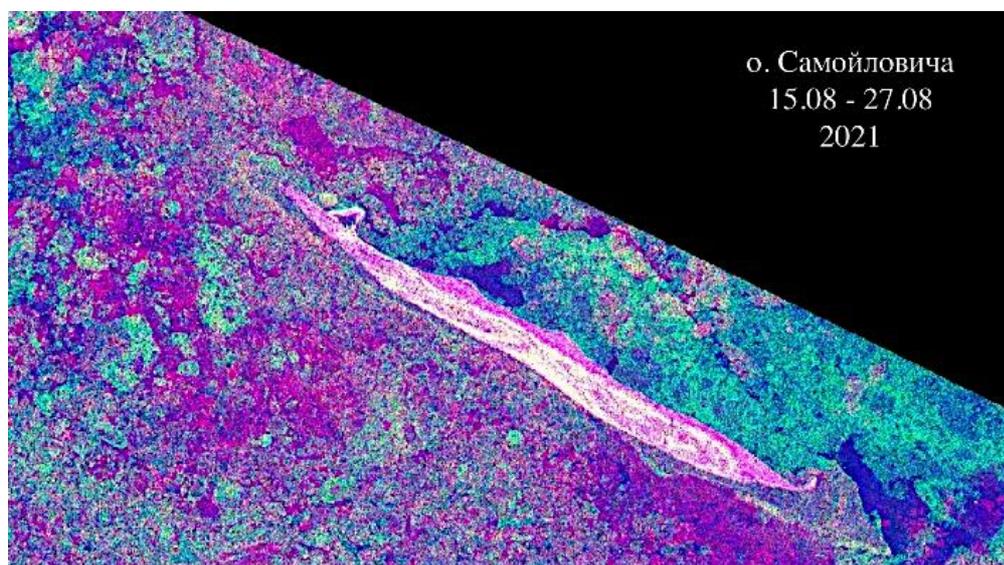
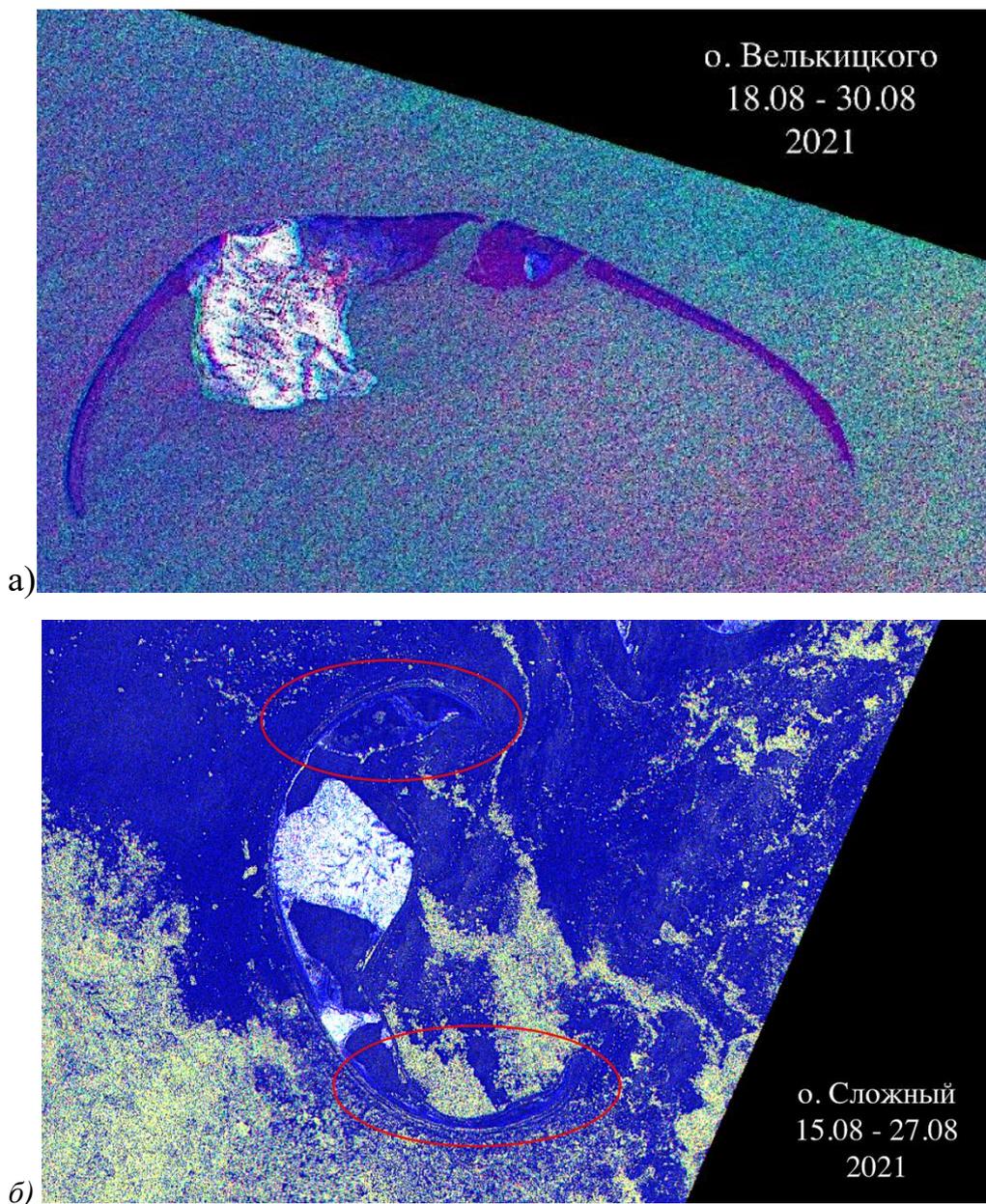


Рисунок 3.17. Летний МТС композит о. Самойловича

У о. Вилькицкого (рис. 3.18, а) отчетливо по синему цвету и характерной форме дешифрируются песчаные косы, для которых характерны низкие значения когерентности и амплитуды. Сходные по цвету песчаные косы можно увидеть и на о. Исаченко (см. рис. 3.14). В то время как на о. Сложный (рис. 3.18, б) косы имеют светлые оттенки, что свидетельствует о наличии более крупнозернистого материала типа гальки. Сравнение со снимком сверхвысокого пространственного разрешения позволяет увидеть на отдельных участках формирующиеся криогенные полигоны, а на других – выраженный рисунок мелких дюн.



*Рисунок 3.18. Летние МТС композиты: а) о. Велькицкого;
б) о. Сложный (красным контуром отмечены косы)*

Для создания карт природно-территориальных особенностей этих малых арктических островов необходимо привлечение дополнительной информации: физико-географических описаний территорий, картографических материалов и результатов съемки в оптическом диапазоне.

3.5 МТС в дешифрировании природно-территориальных комплексов острова Визе⁶

Повторяемость бесснежного периода в июле-августе сохраняется в различные годы, что видно по светлому тону изображения острова на МТС (рис. 3-19). По композитам 2019/07/05 – 2019/07/27, 2019/07/27 – 2019/08/08 и 2020/07/21 – 2020/08/02 отмечается, что середина августа — это время, когда в последние годы поверхность острова свободна от снежного покрова, а его берега – от морского льда. Это означает, что для картографирования поверхности острова наиболее пригодны снимки, полученные в августе.

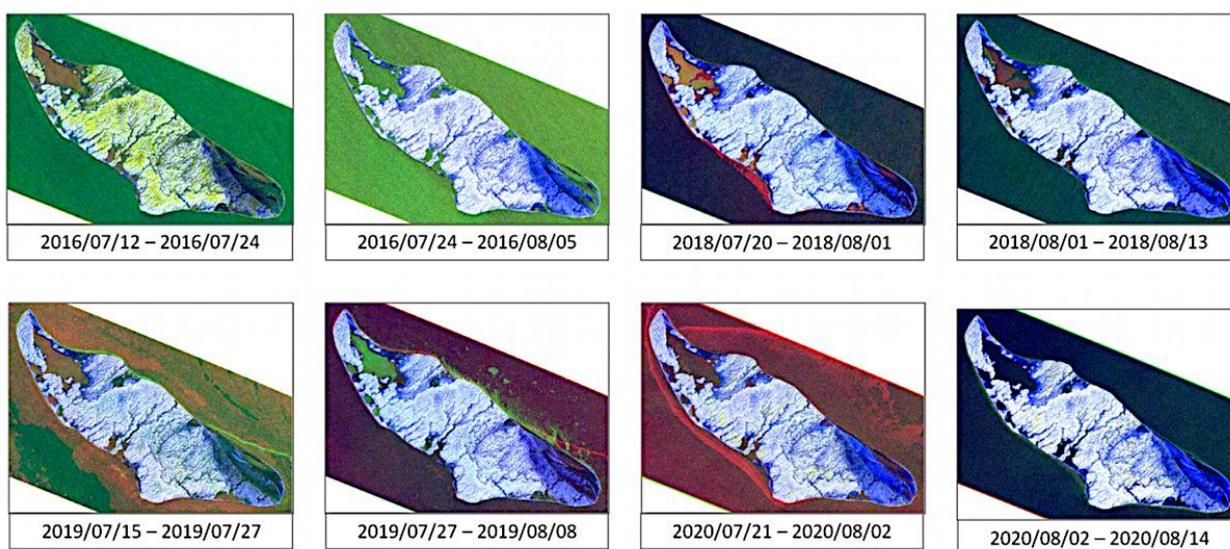


Рисунок 3.19. МТС-изображения «тёплого» сезона для 2016, 2018, 2019 и 2020 годов

Основной итог работы по созданию и анализу мультивременных композитов состоит в том, что полученные МТС позволяют выделить природно-территориальные комплексы (ПТК), а также определить участки с неоднозначным отнесением к тому или иному ПТК.

На основе методики визуального дешифрирования сезонного состояния территории по МТС, представленной в разделе 3.3, с привлечением дополнительных источников пространственных данных была составлена

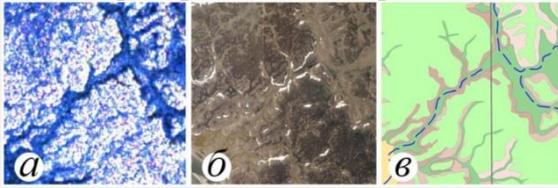
⁶ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Ширшова В.Ю., Балдина Е.А. Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — №4. — С. 79-91.

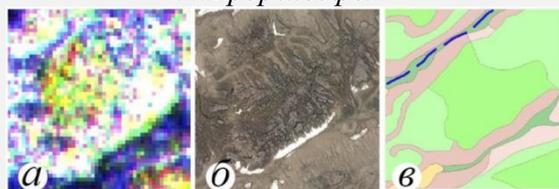
карта природно-территориальных комплексов острова Визе. Карта, представленная в Приложение 4, составлена выпускником кафедры картографии и геоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова 2023 года Ширяевым М.А. под руководством Балдиной Е.А. и Ширшовой В.Ю. В основу выделения ПТК был положен принцип деления территории по двум составляющим: геоморфологической (форма рельефа, генезис, возраст рельефа и слагающие породы) и ландшафтной (процессы, характер поверхности и растительность).

По аналогии с упомянутыми выше принципами интерпретации цветов на МТС для дешифрирования сельскохозяйственных полей (Кантемиров, 2013) эти принципы были адаптированы для ПТК о. Визе. Цвета, получаемые на композитах для арктического региона, совершенно отличны от присущих сельскохозяйственным районам, одинаковы только для инфраструктурных (металлических) объектов. Для арктических территорий интерпретация цветов МТС композитов проводилась при анализе метеорологической информации и физико-географических описаний местности, в результате чего была составлена таблица дешифрованных признаков ПТК на МТС композитах для о. Визе (табл.3-3).

Таблица 3-3. Интерпретация МТС композитов для ПТК о. Визе*

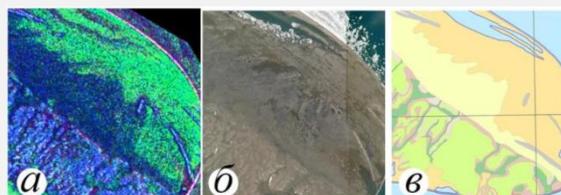
1 Денудационные равнины с термоэрозионными оврагами	4 Равнины обнажений раннемелового цоколя без растительности
	
<p>Денудационные равнины в летний период характеризуются высокими значениями когерентности, что говорит о малом влиянии внешних факторов на данные участки в 12-дневный период. А сочетание выраженного полигонального микрорельефа и разреженной растительности, обуславливающие шероховатость поверхности, дают высокие амплитудные значения, в результате чего равнины приобретают на композитах МТС белый или близкие к белому цвета.</p>	<p>Участок равнины в восточной части острова имеет высокие значения когерентности, так как проявления криогенных процессов и растительности на данном участке отсутствуют; он также имеет хороший дренаж, из-за чего переувлажнения не возникает. Эти факторы, а также низкая диэлектрическая проницаемость песка и зеркальный характер отражения дают низкие значения амплитуд на снимках, в результате чего на летних композитах равнина имеет синий цвет.</p>

2 Равнины с сильновыраженным криогенным полигональным микрорельефом



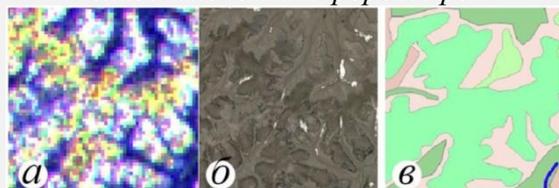
На некоторых композитных изображениях встречаются участки равнин с низкими значениями когерентности, но с высокими значениями амплитуд в оба срока, что обуславливает на композитах МТС желтый цвет. На материалах оптической съемки сверхвысокого разрешения в этих местах хорошо выделяются мелкие сильно раздробленные полигоны. Таким образом, снижения когерентности относятся к междуречным участкам с сильным криогенным расчленением рельефа, вследствие чего возникают искажения сигнала.

5 Морская терраса и осушки



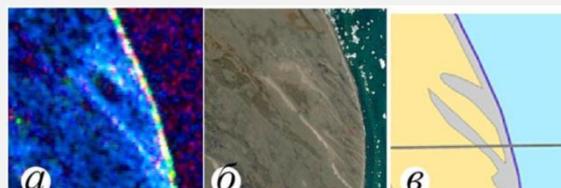
Сочетание низких значений амплитуд и невысоких – когерентности характерно для днищ оврагов и для песчаных морских террас. Слабый отклик сигнала, кроме того, объясняется также низкой диэлектрической проницаемостью грунта, которая даже ниже, чем у воды. Ввиду того, что террасы находятся ниже, влага задерживается дольше, и поэтому значения когерентности ниже, что дает в совокупности темно-синий цвет на композитах. Однако эти плоские песчаные поверхности отличаются от открытой водной поверхности с почти нулевой когерентностью и высокой зашумленностью. Кроме того, на некоторых изображениях в межсезонье вследствие изменения уровня воды меняются значения амплитуды и когерентности – таким образом, выделяются затопляемые участки террасы и осушки, приобретающие красные либо зеленые цвета.

3 Равнины со слабовыраженным полигональным микрорельефом



Участки желтого цвета также встречаются в центральной части равнины и, судя по оптическому изображению – б) соответствуют площадкам, напротив, со слабовыраженным криогенным полигональным микрорельефом, с нерегулярными полигонами и редкими трещинами. Вероятно, в данном случае низкую когерентность может давать растительный покров.

6 Каменистые гряды и галечные пляжи



Вдоль береговой линии, а также на осушках и морских террасах на многовременных композитах выделяются вытянутые узкие полосы с высоким откликом сигнала и высокой когерентностью, которые стабильны на изображениях весь бесснежный период. Так на композитах выделяются валунно-галечные гряды, а также галечные пляжи и косы.

*а) МТС-композит; б) мозаика Esri World Imagery (Maxar); в) карта природно-территориальных комплексов острова Визе (Приложение 4)

Таким образом, совмещение амплитудных и фазовых данных радиолокационной съемки помогло лучше установить ландшафтные градации, определяемые в основном изменением рельефа и увлажнением поверхности, поскольку растительность в этом районе имеет скудное распространение. Было выявлено, что высокие значения когерентности фаз сигналов двух соседних по дате снимков на летний период сохраняются для большей части острова, в частности для поверхности равнин, а также узких валунно-галечных пляжей, и каменистых гряд. Когерентность нарушается у водных поверхностей, а также площадок, подверженных переувлажнению. Низкие значения наблюдаются и в тех местах, где объем растительности наибольший. Влияет на значения когерентности и сильная расчлененность поверхности криогенным микрорельефом – она приводит к искажению сигнала.

Машинно-визуальный подход к дешифрированию МТС для картографирования ПТК

Полученные векторные границы ПТК по карте (см. Приложение 4) были использованы для расчета статистических характеристик значений когерентности и амплитуды в пределах выделов. Для этой цели выбран путь построения блочных диаграмм с ограничителями выбросов, который известен в литературе как «ящик с усами», что позволило выполнить статистический анализ распределения значений когерентности в сочетании с изменениями значений амплитуды на геоизображении МТС. «Ящик с усами» – это график, используемый в описательной статистике, в удобной форме показывающий медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы». Каждой единице ПТК был присвоен свой код для удобства обработки данных и последующей интерпретации (Приложение 5).

Для расчета были выбраны следующие межсезонные МТС:

- зимний начало сезона – 24.11.2019, 06.12.2019 (Приложение 5.1);
- зимний конец сезона – 16.05.2019, 28.05.2019 (Приложение 5.2);

- весенний – 03.07.2019, 15.07.2019 (Приложение 5.3);
- летний – 08.08.2019, 20.08.2019 (Приложение 5.4);
- осенний – 25.09.2019, 07.10.2019 (Приложение 5.5).

На примере современной морской аккумулятивной террасы (рис. 3.20) рассмотрим по блочным диаграммам диапазоны значений амплитуд и когерентности в течение сезона и в каждый сезон отдельно. Этот подход позволит оценить распределение значений для выбранной единицы ПТК. Самые высокие значения когерентности зафиксированы в летний период от 0,53 до 0,78, в остальные сезоны варьируется от 0,3 до 0,6, а самые низкие наблюдаются весной до – 0,25. Значения амплитуд же в течение года находится в интервале от -20дБ до -13дБ.

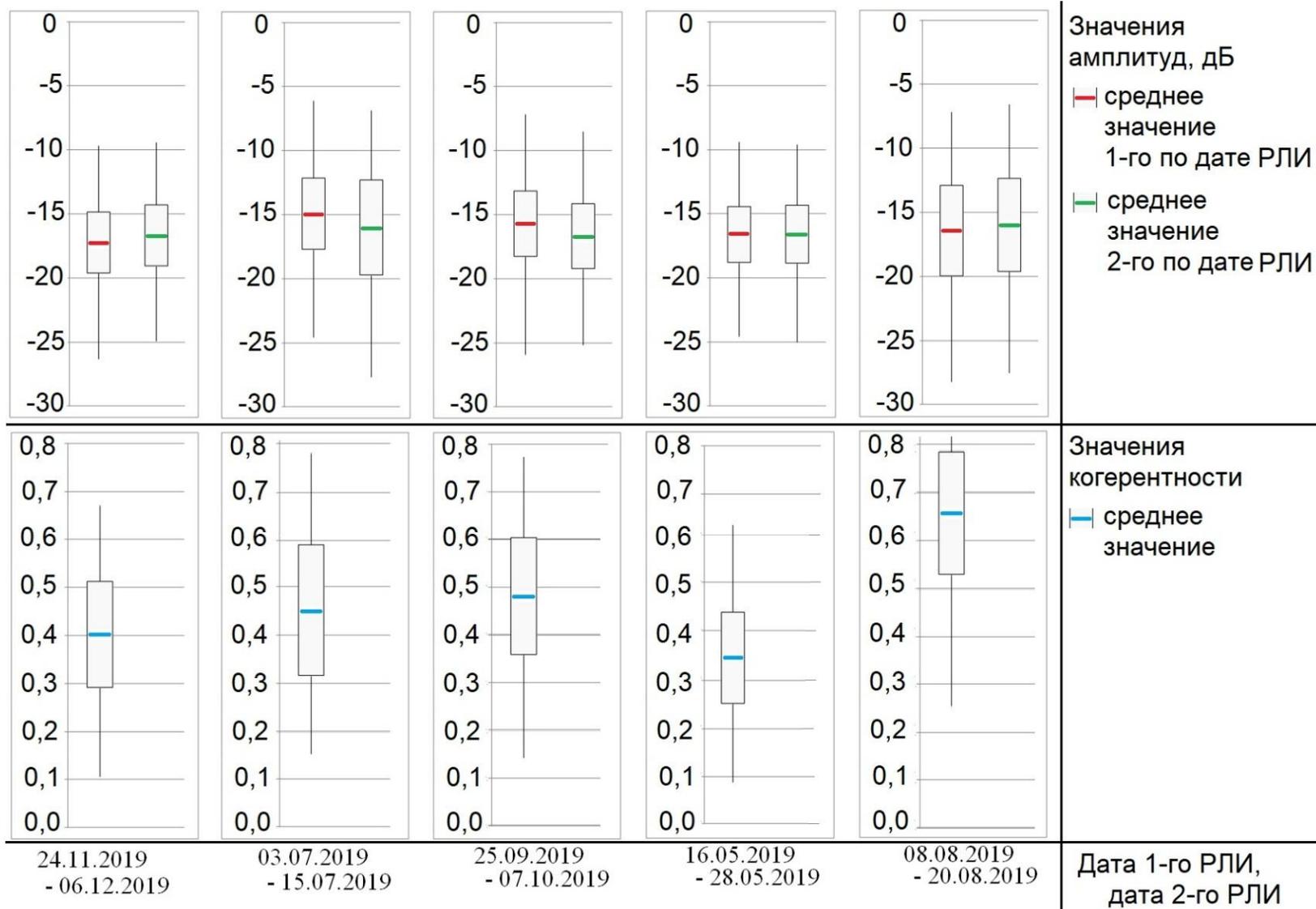


Рисунок 3.20. Блочные диаграммы с ограничителями выбросов для единицы ПТК – современной морской аккумулятивной террасы с каменистыми грядами, построенные для разносезонных МТС изображений

Анализ статистических характеристик по другим типам ПТК (Приложение 5) показывает, что значения когерентности и амплитуд для разных выделов в разные сезоны малоразличимы между выделами, существенные различия в значениях наблюдаются в летний сезон. Однако, основываясь на предположении о том, что одни и те же природно-территориальные единицы ведут себя единообразно в течение года и при смене сезонов, возможно, частично автоматизировать процесс дешифрирования.

Анализ распределения значений когерентности в сочетании с изменениями значений амплитуды на геоизображении МТС (см. Приложение 5) позволил сделать следующие выводы:

1. Для равнины с выраженным криогенным полигональным микрорельефом различий на протяжении зимы в значениях практически нет: не очень высокие значения когерентности в сочетании с амплитудой в среднем порядка -16 дБ. С весной ситуация меняется и сохраняется до летнего периода, а именно для более высоких равнин (12-22 м) характерны более высокие значения амплитуд около -10 дБ, а для низких (6-12 м) – низкие, около -12 дБ. В то время как когерентность изображения равнин не чувствительна к их высоте и одинаково изменчива для равнин этих высотных уровней на протяжении всего сезона.

2. Равнины сильноденудированные с сильновыраженным криогенным микрорельефом (высотами от 12 до 22 метров) сильно изменчивы в течение года: зимой амплитуды достигают -15 дБ, а в летнее порядка -8 дБ, значения когерентности не достигают высоких значений, в основном варьируются около 0,5 и самые высокие значения летом порядка 0,7.

3. Равнины со слабовыраженным криогенным полигональным микрорельефом (высотами от 12 до 22 метров) наиболее изменчивы в течение года среди всех выделенных равнин: разброс значений амплитуд от -17дБ до -10 дБ и также все время низкие значения когерентности за исключением летнего времени.

4. Для участков равнин разных высотных уровней характерно наличие пятнистой растительности с общим проективным покрытием до 10%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой

с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь, что отражается в разбросах значения амплитуды в течение года. Эта тенденция хорошо заметна при сравнении с участком равнины, где обнажен раннемеловой цоколь и не заметны криогенные проявления, для которого также характерны невысокие значения когерентности и в течение года, однако более стабильные значения амплитуд от -18 дБ зимой до -15 дБ летом.

5. Для заболоченных котловин характерны довольно высокие значения когерентности в летнее время и крайне низкие весной, порядка 0,18, что связано с наличием мохово-лишайниковой растительности, подверженной сезонным изменениям, в то время как значения амплитуд меняются аналогично другим частям равнины.

6. Единственный антропогенно-преобразованный полигон на о. Визе легко дешифрируется на любом временном МТС композите и это прослеживается в распределении значений: высокие значения когерентности в течение года, обеспечивают металлические конструкции, так же в конце зимы наблюдаются нехарактерно низкие значения когерентности, что связано с процессами таяния.

Таким образом, распределения значений когерентности в сочетании с изменениями значений амплитуды на геоизображении МТС подтверждают предположение о том, что изменение значений амплитуды и когерентности на МТС практически для всех единиц ПТК в течение сезона единообразно для каждой единицы в отдельности. Исключениями являются склоны, которые здесь мвлы по размеру, однако, для утверждения невозможности их классификации по данным МТС следует проверить это на данных более высокого пространственного разрешения, например данных «Кондор-ФКА». Также, летние МТС – самые удачные для дешифрирования, распределение значений когерентности и амплитуд – позволяют более четко выявить максимальные и минимальные границы значений амплитуд и когерентности для разных единиц ПТК. Машинно-визуальный метод дешифрирования может быть применен как оптимизирующий шаг при визуальном дешифрировании.

3.6 Порядок реализации методики применения МТС для мониторинга и картографирования малых арктических островов

Применение МТС композитов может быть востребовано при решении двух задач исследования малых арктических островов: мониторинга сезонной изменчивости земной поверхности и картографирования. Составленная блок-схема по представленной в главе методике указывает порядок действий, необходимых для решения каждой из этих задач (рис. 3.21).

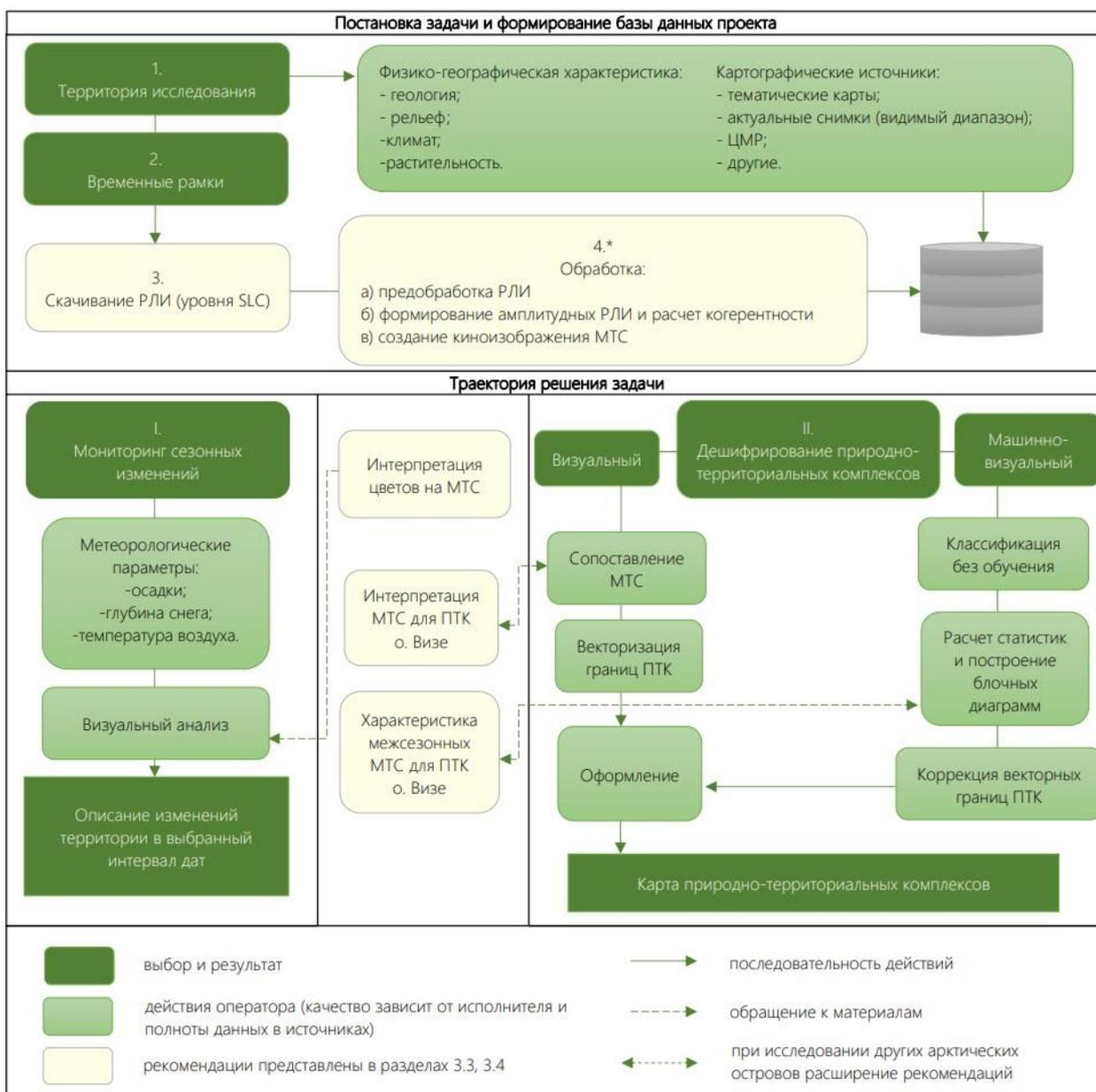


Рисунок 3.21. Блок-схема методики применения мультивременного композита с когерентностью для картографирования малых арктических островов (4.* – см. рис 3-5)

Постановка задачи и формирование базы данных проекта. Для территории исследования собираются основные физико-географические

характеристики и существующие картографические источники. Качество собранной информации зависит от двух факторов: полноты и достоверности собранных сведений и квалификации исполнителя. Временные рамки могут следовать из поставленной задачи и уточняться в процессе сбора информации. После скачивания РЛИ обработка выполняется согласно приведенной блок-схеме (см. рис. 3.6) и рекомендациям раздела 3.2.

Траектория решения задачи. При мониторинге сезонных изменений возможна только одна траектория, в качестве опорной информации при визуальном анализе следует обращаться к материалам, охарактеризованным в разделе 3.3. Дешифрирование возможно выполнять одним из удобных способов: визуальным или машинно-визуальным. Так как база дешифровочных признаков – интерпретация природно-территориальных единиц на МТС и соответственно характеристики межсезонных МТС – были составлены для о. Визе, то при картографировании других малых арктических островов предполагается расширение набора природно-территориальных единиц на МТС композитах.

Выводы к главе 3

1. МТС – мультिवременной композит с когерентностью является новым видом геоизображений и представляет собой как самостоятельный информационный продукт, так и инструмент мониторинга изменений. Для картографирования природно-территориальных единиц арктических островов следует использовать летние геоизображения МТС. Анализ сезонной изменчивости целесообразно проводить по мультिवременным композитам с когерентностью, которые сформированы по данным Sentinel-1 с 12-дневным интервалом между съемками в течение всего года.

2. Среди существующих методов дешифрирования с целью картографирования наиболее подходящим на данный момент для МТС является визуальный метод. Именно этим методом по МТС была составлена карта природно-территориальных комплексов о. Визе и систематизированы основные цвета на геоизображении.

3. Машинно-визуальный метод дешифрирования может быть применен как оптимизирующий шаг при визуальном дешифрировании. В силу специфики радиолокационной информации (шум, переотражение) автоматические методы классификации для природно-территориальных комплексов не подходят. Машинно-визуальный подход к дешифрированию является рациональным решением: автоматическое выделение классов по летним МТС и затем их визуальное дешифрирование. В то же время у метода есть потенциал для большей автоматизации при расширении базы МТС арктических островов и увеличения набора данных для создания МТС (охват других диапазонов длин волн и более высокое пространственное разрешение). Дополнение таблицы особенностей отображения единиц ПТК и набора для каждого типа блочных диаграмм с ограничениями выбросов, созданных на основе МТС о. Визе, может стать инструментом для машинно-визуального дешифрирования арктического региона в целом.

4. Разработанный ранее метод мониторинга сельскохозяйственных территорий на основе МТС усовершенствован и адаптирован для арктических островов. Прежде всего, анализ МТС необходимо проводить совместно с метеорологической информацией, т.к. значения когерентности коррелируют с переменами погоды в условиях арктического региона – резкими перепадами температур и выпадением осадков – при таких изменениях ее значения достигают критических значений (от 0,1 до 0,3). Таким образом, при сочетании значений когерентности с метеорологическими параметрами становится возможным отслеживать связь изменений разных типов поверхности с погодными изменениями и их интерпретировать.

Глава 4. Методика учета природных условий и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии на примере Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии

4.1 Обоснование района исследования

Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия относится к Узон-Гейзерному административному центру Кроноцкого государственного биосферного заповедника. Узон-Гейзерный кальдерный комплекс имеет площадь 150 км², с запада на восток протягивается на 17-18 км, с севера на юг – на 9-10 км. Наинизшая точка котловины находится на высоте 600 м, а наивысшая – Бараний пик – имеет высоту 1610 м. С западной стороны долины реки Гейзерной примыкает вулкан Кихпинич – действующий стратовулкан, включающий несколько конусов с максимальной высотой (конуса Савича) 1552 м (*Брайцева и др., 1991*).

В пределах Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии находится одна из крупнейших геотермальных зон – долина р. Гейзерной. В ее пределах сосредоточены многочисленные термальные источники и термальные поля, озера, речки и ручьи. В пределах кальдеры Узон выделяются 5 термальных полей: Восточное, Фумарольное, Западное, Оранжевое, Северное. Крупнейшим является Восточное поле, протянувшееся на 1,5 км в широтном направлении. Гидротермальные проявления выражены на территории протяженностью около 3 км и шириной 200-400 м. Они представлены горячими источниками, газопаровыми струями, фумаролами, парящими прогретыми площадями, бессточными воронками, грязевыми котлами, грязевыми вулканчиками, грифонами с кипящей водой, термальными озерами и ручьями. Температура источников 45-96°С (*Леонов, 1991*).

Кальдера вулкана Узон расположена в западной части Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии. Сама кальдера располагается на высотах 650-700 м над ур. моря (рис. 4.1).

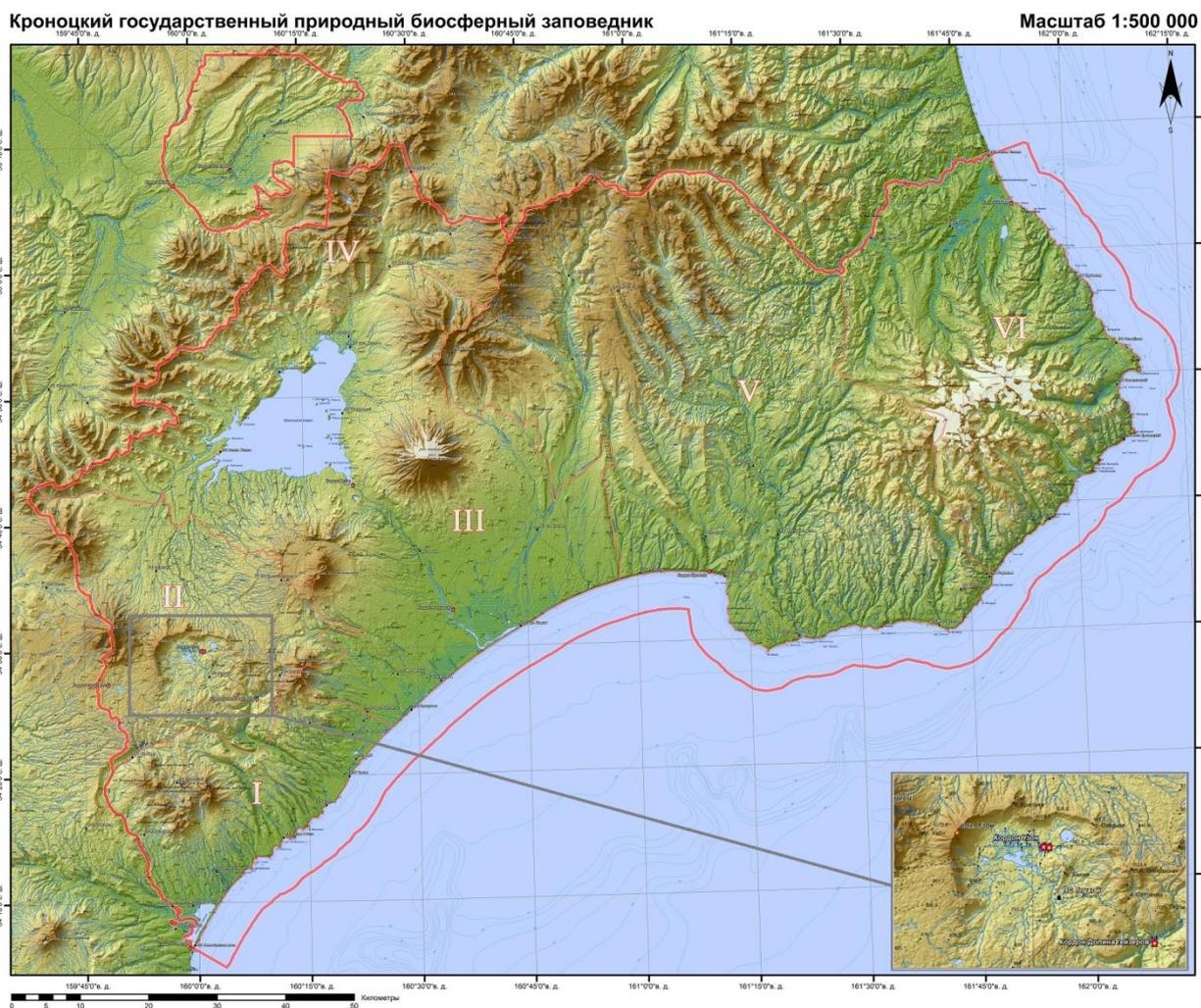


Рисунок 4.1. Территория Кроноцкого государственного биосферного заповедника с административным делением: I – Семячинский, II – Узон-Гейзерный, III – Центральный, IV – Лазовский, V – Кроноцкий, VI – Чажминский (<https://kronoki.ru>)

Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия сформировалась в верхнем плейстоцене (примерно 80-40 тыс. лет назад). Впоследствии со снижением вулканической активности в пределах кальдер образовались вулканические озера (Сугробов и др., 2009). Вокруг Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии образовались новые экструзивные купола и крупные стратовулканы, в том числе Кихпиныч – один из самых молодых вулканов Восточной Камчатки, конусы которого сформировались в разное время в промежутке 1,5-4,5 тыс. лет назад (Брайцева и др., 1991). С наступлением голоцена активизация эрозионных процессов поспособствовала разрушению бортов старых кальдер, что привело к спуску озер и формированию рек Шумной и Гейзерной, а их активное врезание – к заложению теснинообразных долин.

Борта Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии сложены экструзивными породами верхнего плейстоцена (андезитами, дацитами, липаритами), а также озерными отложениями позднего плейстоцена, включающими ранее излившиеся породы (туфопесчанники, туфогравелиты). В днище долины река Гейзерная обнажает экструзивный докальдерный комплекс отложений, представленный пемзами и пемзовыми брекчиями. Почвенный покров долины представлен термозёмами мощностью от 10 до 40 см, не промерзающими даже зимой благодаря притоку эндогенного тепла от неглубоко залегающих магматических очагов (*Атлас долины..., 2015; Леонов и др., 1991*). Поверхности вулкана Кихпинич представляют собой шлаковые поля с содержанием песков и дресвы, состоящих из обломков лав и метаморфизованных пород, а также лапилли. Поля покрыты слоем дернины (*Брайцева и др., 1985*). Еще более сильное влияние на облик долины оказывают гравитационные процессы. Отмечается, что для малых рек такие широкие долины не характерны (*Устинова, 1955*) – расширение происходит за счет набора оползневых процессов: обвалов, осыпей, оползней в верхней части бортов долины, а также оплывания и оползания в нижней ее части. Именно оползневые процессы придают долине ступенчатый характер (*Лебедева и др., 2020*). Способствуют этому крутые склоны долины, наличие озерных отложений в их строении, присутствие множества трещин, а также множества водопроницаемых и водоупорных горизонтов (*Леонов, 2008*). Весомым катализатором этих процессов служит магматический очаг (*Белоусов и др., 1983; Кугаенко и др., 2007*), способствующий тектоническому поднятию территории (*Кугаенко и др., 2010*). Самые крупные оползни произошли в 1981, 2007 и 2014 годах. Так оползень, сошедший 3 июня 2007 года и сопровождавшийся селевым потоком, кардинально изменил облик долины – в результате обломочный материал перекрыл русло реки, образовав озеро, и некоторые гейзеры были утеряны безвозвратно (*Леонов, 2008*).

Климат территории относят к дальневосточной муссонной области, он определяется циркуляционными процессами над Беринговым морем и характеризуется пасмурной, дождливой и ветреной погодой. Часто наблюдаются ураганные ветры, обильные осадки, сильные и продолжительные метели. Среднегодовая температура в районе долины составляет $+2,7^{\circ}\text{C}$, средняя температура самого теплого месяца – августа – $+13,1^{\circ}\text{C}$, средняя температура самого холодного – января – $-5,8^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая норма осадков – около 1200 мм. Снежный покров на территории держится с октября по июль, его высота составляет от 0,7 до 2,0 м (*Кроноцкий заповедник; Погода и климат*).

В системе геоботанического районирования Камчатки Узон-Гейзерный гидротермальный район относится к Восточному вулканическому округу Восточной вулканической провинции Камчатской лиственной подобласти Евразийской таежной области (*Нешатаева, Пестеров, 2012*). Растительность представлена термофильными травянистыми сообществами, на склонах господствуют стланиковые заросли, а также отдельно стоящие березы. По краям Узон-Гейзерная вулкано-тектоническая депрессия окружена горно-тундровыми сообществами. Вегетационный период продолжается с середины июня по конец сентября.

В целом выбор территории Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии для настоящего исследования обусловлен несколькими факторами. Для нее характерно: сочетание равнинного и горного рельефа, неравномерное покрытие растительностью (от стланиковых зарослей и отдельно стоящих берез на склонах, до низкотравья в кальдере Узон и полного отсутствия растительности на осыпях и обнажениях горных пород) и резко переменчивая погода при относительно коротком бесснежном периоде, а самое главное – наличие процессов, приводящих к изменениям высоты земной поверхности. Эта территория характеризуется высокой активностью склоновых и газогидротермальных процессов, проявления, в пределах которой необходимо осуществлять постоянный мониторинг земных

подвижек с целью долгосрочного прогноза таких явлений (Двигало, Мелекесцев, 2009; Лебедева и др., 2022). Известный опыт определения смещений земной поверхности кальдеры Узон методом дифференциальной интерферометрии (Lundgren, Lu, 2006), хотя и не обоснован в достаточной степени с точки зрения учета влияния различных факторов, все же получил неоднократное обоснование в работах, основанных на данных о геологическом строении и микросейсмических исследованиях (Кугаенко и др., 2010 и 2015; Kiryukhin, 2016; Чебров и др., 2019). Однако такие природные условия накладывают ряд ограничений, связанных с выбором интерферометрических данных и их обработкой. Отсутствие устойчивых отражателей, характерное для всех природных территорий, обосновывает необходимость разработки особого методического подхода при выборе и обработке пар изображений.

4.2 Обзор предыдущего опыта исследования смещений поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии методом дифференциальной интерферометрии⁷

Метод дифференциальной интерферометрии для анализа смещений рельефа в восточной части кальдеры Камчатки – Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии – ранее уже был применён (Lundgren, Lu, 2006). В исследовании были использованы снимки с КА RADARSAT-1 на период времени с 1999 по 2004 годы.

Методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии были смоделированы интерферограммы по снимкам с разными углами визирования: 48°, 38° и 42° над кальдерой (рис. 4-2). На интерферограммах каждая интерференционная линия представляет собой 2,8 см смещения поверхности LOS. Штриховые линии обозначают край кальдеры. Для каждой

⁷ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Ширишова В.Ю., Балдина Е.А., Лебедева Е.В. Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — №4. — С. 133-146.

приведенной на рисунке 4-2 интерферограммы указаны даты РЛИ, длина перпендикулярных базовых линий и угол визирования на поверхность кальдеры Узон. Так же для интерферометрических пар с КА RADARSAT-1 характерна очень большая временная база величиной от одного календарного года до четырех, а для анализа были использованы августовские и сентябрьские снимки. Значения когерентности выше порогового значения использовались в качестве маски на процессе развертки фазы. Пространственное разрешение используемых данных не указано. Известно, что RADARSAT-1 осуществляет съемку земной поверхности в 6 режимах с пространственным разрешением от 100 м до 1 м.

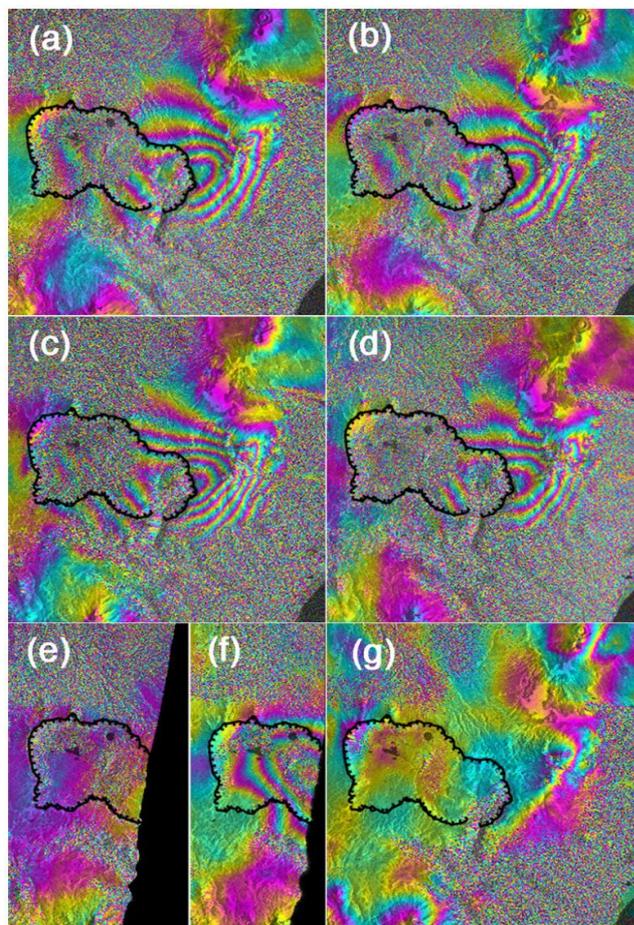


Рисунок 4.2. Интерферограммы на территорию Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии (Lundgren, Lu, 2006):

- (a) 2000/08/23–2003/08/08. Базовая линия = -54. Угол визирования 48°
- (b) 2000/08/23–2004/09/19. Базовая линия = 176. Угол визирования 48°
- (c) 2000/09/19–2003/08/11. Базовая линия = -58. Угол визирования 38°
- (d) 2000/09/16–2004/08/02. Базовая линия = 126. Угол визирования 48°
- (e) 1999/09/08–2000/09/02. Базовая линия = 483. Угол визирования 42°
- (f) 2000/09/02–2003/08/18. Базовая линия = 218. Угол визирования 42°
- (g) 2003/09/04–2004/08/05. Базовая линия = 80. Угол визирования 38°

Исследование смещений показало, что по парам с 1999 по 2000 год и с 2003 по 2004 г., нет значительных деформаций, а по паре снимков 2000 и 2003 г. было зафиксировано поднятие примерно на 0,15 м, которое авторы предположительно связали с пополнением магматической камеры долгоживущего вулканического центра Кихпиныч и сопутствующими процессами.

В исследовании (*Lundgren, Lu, 2006*) ничего не сказано о критериях подбора интерферометрических пар – вероятно, использовались все доступные на данную территорию снимки. Также стоит отметить, что использование больших временных баз длиной больше года не привело к пространственной декорреляции сигнала, чему могло поспособствовать незначительное влияние растительности. С технической точки зрения это исследование интересно, прежде всего, тем, что тут были проанализированы интерферограммы, полученные по РЛИ с разными величинами базовых линий, углов визирования и временным интервалом.

Для определения смещений рельефа в пределах вулкано-тектонической депрессии стола необходимо дополнить методику учетом условий местности и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии. В условиях того, что физико-географические свойства местности могут внести ложные смещения из-за некорректно выбранных исходных данных и/или ошибок в обработке информации, именно это обстоятельство определяет выбор из архива снимков с требуемыми параметрами и также формирует оптимальные требования к съемке.

4.3 Порядок обработки исходных данных и дополнительной информации⁸

Выбор параметров РЛИ является первым этапом работы при интерферометрической обработке и напрямую зависит от физико-географических особенностей и состояния местности (*Бадак и др., 2021.; Шишова и др., 2023*). Для получения информационного продукта – карты смещений – необходимо формирование корректной интерферограммы, что обеспечивается высокой когерентностью пары РЛИ и отсутствием радиолокационных эффектов: теней и переналожений. Высокую когерентность обеспечивает отсутствие видимых изменений погоды (резкий перепад температур, выпадение осадков) и древесно-кустарниковой растительности (*Захаров и др., 2017, 2023; Добрынин и др., 2017, 2018*).

Обоснование выбора данных с оптимальными параметрами съемки для КА Sentinel-1 на исследуемую территорию

Проявление радиолокационных эффектов: тени и переналожения (см. раздел 2.1) можно минимизировать на РЛИ в интересующей области при корректно подобранных углах визирования и направления съемки. Переналожения вершин и радиолокационные тени отображаются на амплитудной составляющей РЛИ. Предварительный визуальный анализ амплитудных изображений – один из оптимальных по времени способов выбора подходящей геометрии съемки с минимальными радиолокационными эффектами в интересующей области.

⁸ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Шишова В.Ю., Балдина Е.А., Лебедева Е.В. Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — №4. — С. 133-146.

Для территории Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии среди данных в архиве Sentinel-1 было доступно 4 варианта съемки при различной геометрии (рис. 4.3.).



Рисунок 4.3. Снимки Sentinel-1 (голубые рамки), покрывающие территорию Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии – желтый прямоугольник

У каждого из четырех вариантов геометрии разные параметры съемки (табл.4-1, рис. 4.4). Так как Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия располагается на РЛИ в разных подполосах (см. раздел 2.4), это дало возможность выбирать не только виток – восходящий или нисходящий, но и углы визирования.

Таблица 4-1. Параметры съемок на территорию Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии

Параметр	Геометрия 1	Геометрия 2	Геометрия 3	Геометрия 4
Направление орбиты	нисходящее	нисходящее	восходящее	восходящее
Поляризация	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ
Путь	162	60	140	38
Кадр	408	409	176	172
Углы визирования	~ 41°-46°	~ 29°-35°	~ 29°-35°	~ 41°-46°

Все данные для исследуемой территории доступны только в одном режиме поляризации – ВВ+ВГ. Для минимизации шума при дифференциальной интерферометрической обработке выбраны данные в согласованной вертикальной поляризации – ВВ. Учитывая преимущественно западную экспозицию исследуемого участка с не крутыми склонами и восточную экспозицию в тех местах, где произошли оползневые процессы в 2007 и 2014 годах, во избежание попадания этих участков в теневую область, были выбраны снимки, полученные с нисходящего витка орбиты. Варианты геометрии 1 и 3

имеют одинаковые углы визирования, но так как они реализованы при разных направлениях орбит, эти варианты представляют собой принципиально разные РЛИ. На геометрии 1 Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия попала на границу кадра, что не желательно для дальнейшей обработки – вследствие дефектов затемнённых краев РЛИ (рис.4-4 а).

Для всех возможных 4 вариантов геометрии съемки комплексные изображения были обработаны до геокодированных амплитудных РЛИ и затем на изображения наложен полигон, полученный по описанию места смещения из исследования (*Lundgren, Lu, 2006*).

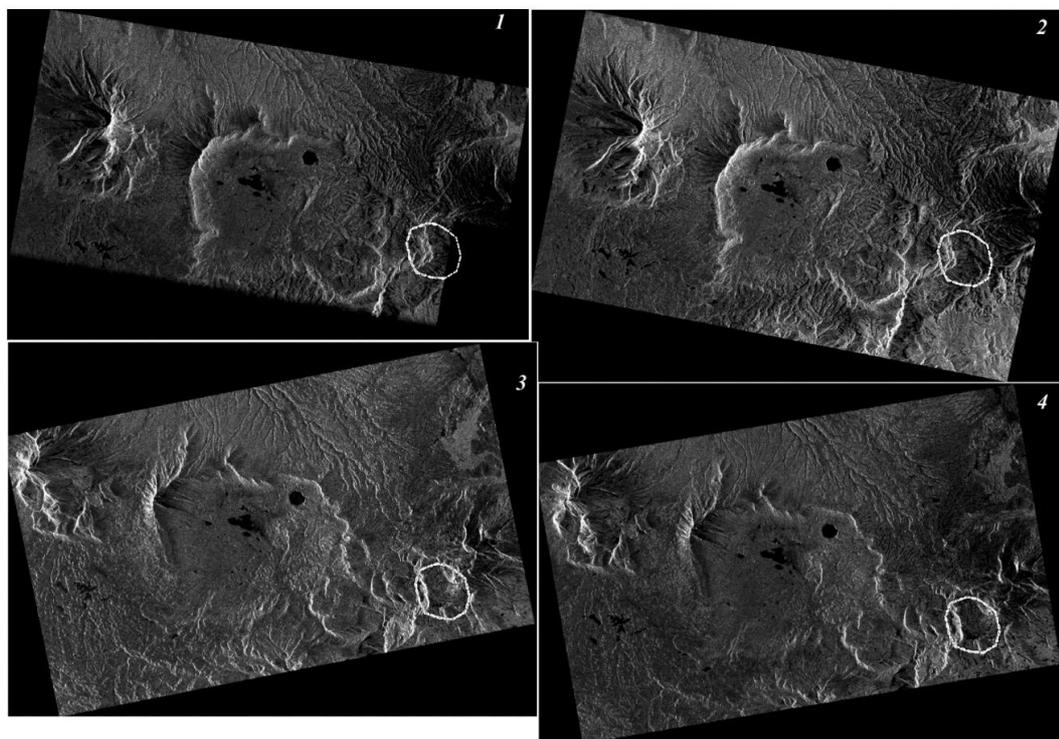


Рисунок 4.4. Амплитудные снимки Sentinel-1 цифры соответствуют номерам геометрии съемки (см. таблицу 4-1), белым контуром показан участок, в пределах которого были определены смещения в 2003 году

Для определения смещений были выбраны РЛИ с нисходящей орбиты и углами визирования от 29° до 35° , т.к. они являются наиболее подходящими с точки зрения минимизации радиолокационных эффектов в области интереса (см. табл. 4-1 геометрия 2).

Итак, предварительная оценка рельефа местности, с точки зрения возникновения радиолокационных эффектов на амплитудных РЛИ, ограничила выбор данных в 4 раза. Такой подход позволил оптимизировать время, затрачиваемое на интерферометрическую обработку.

Обоснование выбора периода съемки для КА Sentinel-1 на исследуемую территорию

Краткий анализ физико-географических особенностей Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии (см. раздел 4.1) позволил сделать следующие заключение относительно периода съемки. Ввиду того, что территория характеризуется очень коротким бесснежным периодом и разнообразием растительности – интервал проведения интерферометрической съёмки, целесообразной для открытой поверхности непродолжителен. Еще один ограничивающий фактор – на склоне вулкана Кихпиныч несплошной снежный покров сохраняется до конца августа, а в 2018, 2019 и 2020 сохранялся в течение всего летнего периода. Это обстоятельство пришлось учитывать на этапе обработке пар РЛИ путем маскирования вершин вулкана, где в свою очередь наблюдались и низкие значения когерентности.

В совместном исследовании автора работы со студентом кафедры картографии и геоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова Ширяева М.А. в рамках выполнения им выпускной квалификационной работы бакалавра была проведена оценка влияния условий среды на пригодность данных через значения когерентности. В результате было получено подтверждение, что выбранных метеорологических параметров достаточно, чтобы определить оптимальную пригодность снимков для дальнейшей обработки. Также наиболее благоприятный сезон для наблюдений – август, где наблюдалась высокие значения когерентности.

Всего с 2017 по 2022 год было получено 24 РЛИ на летнее время года: конец июля, август, начало сентября (*табл. 4-2*).

Таблица 4-2. РЛИ Sentinel-1B

2017 год	2019 год	2021 год
06.08.2017	27.07.2019	28.07.2021
18.08.2017	08.08.2019	09.08.2021
30.08.2017	20.08.2019	21.08.2021
11.09.2017	01.09.2019	02.09.2021

2018 год	2020 год	2022 год
01.08.2018	02.08.2020	04.08.2022
13.08.2018	14.08.2020	16.08.2022
25.08.2018	26.08.2020	28.08.2022
06.09.2018	07.09.2020	09.09.2022
18.09.2018		

Обоснование выбора источника информации о погоде

Интервал замыкания орбит у Sentinel-1 12 дней, и за этот период когерентность может иметь низкие значения из-за ряда причин: состояние растительности, осадки и перепад температур. Так как связь когерентности и изменений погоды была доказана, то стало необходимым соблюдение постоянства метеорологических условий в моменты съемки. Выбор дополнительной пространственной информации – источника метеорологических параметров – проводился с целью исключить даты, в которые наблюдались осадки, т.к. их наличие является основным препятствием для получения когерентной пары РЛИ.

На территории Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии отсутствует метеорологическая станция, поэтому необходимо было использование ближайшей. Выбор был из нескольких близко расположенных метеостанций: Мильково, Кроноки и Семячик, все они находятся на расстоянии 50–100 км от кальдеры Узон, причем на значительно меньших абсолютных высотах. Данные с метеостанций, расположенных в долинах и на побережье, могут не полностью соответствовать состоянию погоды в исследуемом районе в моменты съемки. Для выбора РЛИ использовались данные с метеостанции в поселке Мильково, расположенном в долине р. Камчатки на расстоянии около 85–100 км от Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии на высоте над у.м. 179 м. Ввиду большей континентальности климата в Мильково, как правило, летние температуры выше, а осадков гораздо меньше. В то время как на исследуемой территории, расположенной на отметках 400–1500 м над у.м. сильнее влияние моря и ниже температура из-за высоты. Кроноки и Семячик расположены на

побережье – севернее и южнее соответственно, на высотах менее 30 м над у.м. Расположение этих станций в большей степени отражает влияние морского климата. Поэтому предпочтение было отдано данным с метеостанции Мильково.

Значения по трём параметрам погоды представлены в *табл.4-3*. При этом состояние погоды может быть несколько различным даже в разных частях самого исследуемого района. Для отбора радиолокационных интерферометрических данных такой точности было достаточно. Источником этой информации послужил сайт (*Расписание погоды, URL: <https://rp5.ru/>*), где доступны для скачивания архивы по заданному интервалу дат с выбранной метеостанции.

Таблица 4-3. Метеорологические данные на даты съемок по м/с Мильково

Дата	Температура, °С	Ветер, м/с	Осадки, мм
06.08.2017	18,6	1	12
18.08.2017	15,5	1	нет
30.08.2017	11,9	3	нет
11.09.2017	9,7	1	2
01.08.2018	16,1	2	нет
13.08.2018	15,7	2	нет
25.08.2018	13,1	2	нет
06.09.2018	13,1	3	нет
18.09.2018	10,8	4	5
27.07.2019	17,7	1	нет
08.08.2019	12,9	3	0.8
20.08.2019	13,8	3	0.1
01.09.2019	13,5	1	нет
02.08.2020	15,3	1	нет
14.08.2020	11,3	3	0.6
26.08.2020	7,8	3	14
07.09.2020	10	2	1
28.07.2021	19,8	2	нет
09.08.2021	11,7	2	нет

Дата	Температура, °С	Ветер, м/с	Осадки, мм
21.08.2021	19,4	3	нет
02.09.2021	15	3	6
04.08.2022	14,6	2	нет
16.08.2022	16,1	5	0.5
28.08.2022	12,1	1	3
09.09.2022	17,2	6	нет

Метеорологическая информация была выбрана на все периоды съемки за 6 лет, захватывая 3 дня до получения первого РЛИ (Приложение 6). Время съемки данной территории 5:30, поэтому для температуры брались показатели в 6 утра, информация по осадкам и ветру – максимальная за сутки (UTC).

Для контроля параметров погоды был сделан запрос в ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник», где начальниками кордонов осуществляются наблюдения за метеопараметрами, необходимыми для вертолетной навигации. Информация фиксировалась дважды в сутки в 9:00 и 17:00. Сравнение параметров погоды показало, что отличия в температуре не превышали на 1-2 градуса, что не критично ввиду того, что данные с метеостанций собирались по времени 6:00. Подтвердилось также отсутствие осадков на отобранные даты съемки КА Sentinel-1.

Дифференциальная интерферометрическая обработка радиолокационных изображений

Методом дифференциальной интерферометрии определяются LOS-смещения (см. рис. 1.6), получение которых можно разделить на 5 этапов (рис. 4.5):

- предобработка РЛИ;
- формирование интерферограммы и расчет когерентности;
- формирование дифференциальной интерферограммы;
- развертка фазы;
- формирование карты смещений.

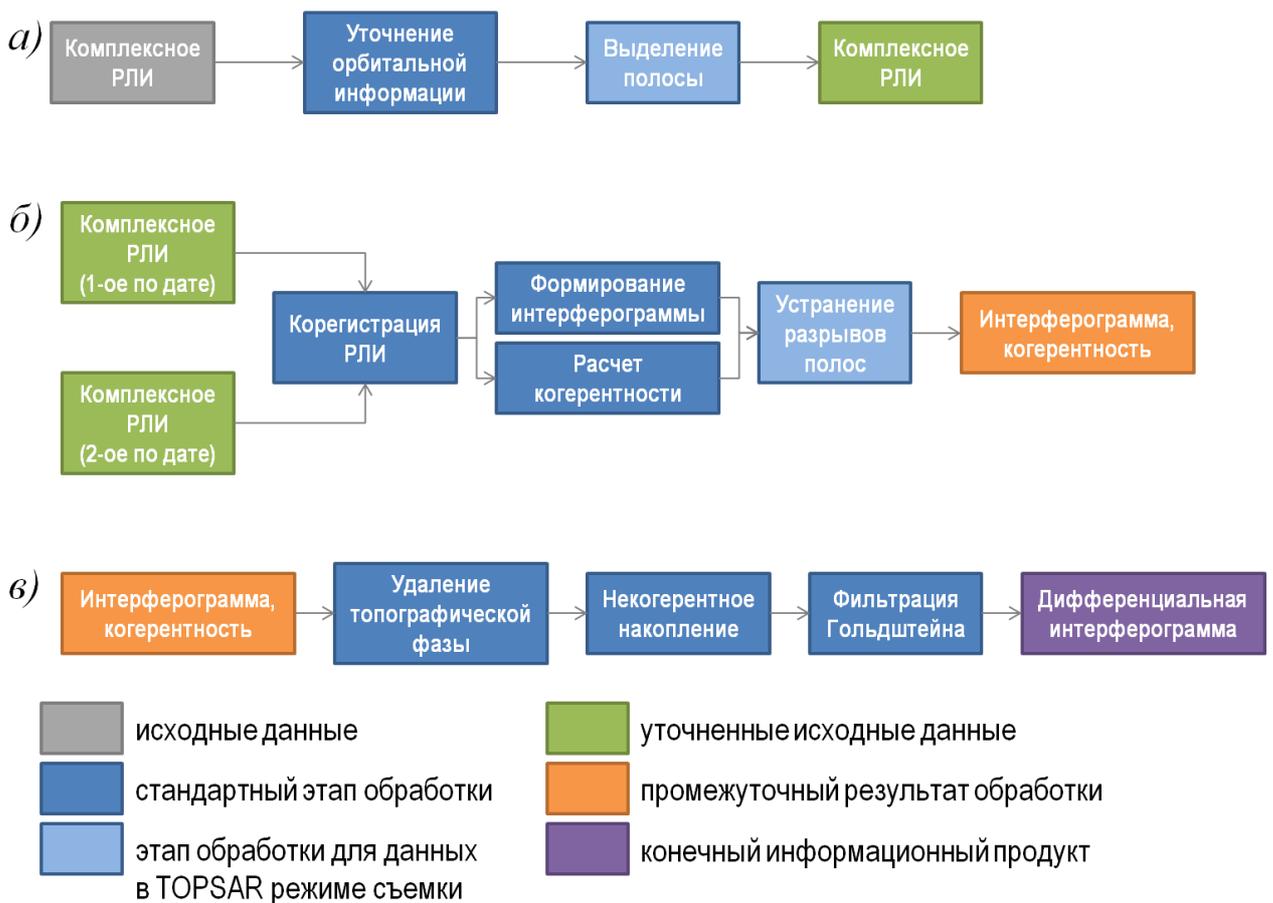


Рисунок 4.5. Этапы дифференциальной интерферометрической обработки РЛИ:
 а) предобработка РЛИ; б) формирование интерферограммы;
 в) формирование дифференциальной интерферограммы

Все этапы обработки были автоматизированы ПО SNAP путем создания графов.

В процессе предобработки было выполнено уточнение орбитальной информации на момент съемки и выбор фрагмента кадра (см. рис. 4.5 а). Области исследования соответствовала полоса IW1 и подполосы 7-8. Эта процедура выполнена пакетно для всех отобранных РЛИ, что существенно оптимизировало весь дальнейший процесс обработки. Затем внутригодовые и межгодовые интерферограммы и изображения когерентности были рассчитаны с помощью графа (см. рис. 4.5 б).

В результате обработки всевозможных пар из всего массива данных (см. табл. 4-2) получилось 260 интерферограмм. Комбинации пар снимков составлены с учетом того, что ведущий снимок – более ранний по дате относительно подчиненного.

Изначально были сформированы внутригодовые интерферограммы – т.е. все возможные комбинации ведущего и подчиненного снимков за один год. Затем, проводился визуальный анализ этих данных с сопоставлением сведений о погоде. Это позволило исключить однозначно непригодные РЛИ, ввиду чувствительности интерферометрической когерентности к изменениям погоды. Так было установлено, что *если накануне съемки были осадки, то когерентность с большой долей вероятности будет настолько низкой, что интерферограмма не будет пригодна для последующей обработки* (рис. 4.6 Ia). В то время как в случаях, когда осадки и перепады температур приходились на середину 12 дневного интервала или происходили за несколько дней до съемки, то когерентность была высокой – местами до 0,9 (рис. 4.6 Ib).

Установленная зависимость когерентности от погодных условий стала важным фильтром для пар РЛИ. Из пригодных по когерентности пар были отбраны пары с возможностью реализации дифференциальной интерферометрии по временному условию – с наибольшей временной базовой линией – при дополнительном учете близости погодных условий во время съемки и накануне.

В итоге для территории Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии из 24 имеющихся РЛИ были отбраны 8 РЛИ, среди которых самые ранние те, что были получены 18.08.2017 и 30.08.2017.

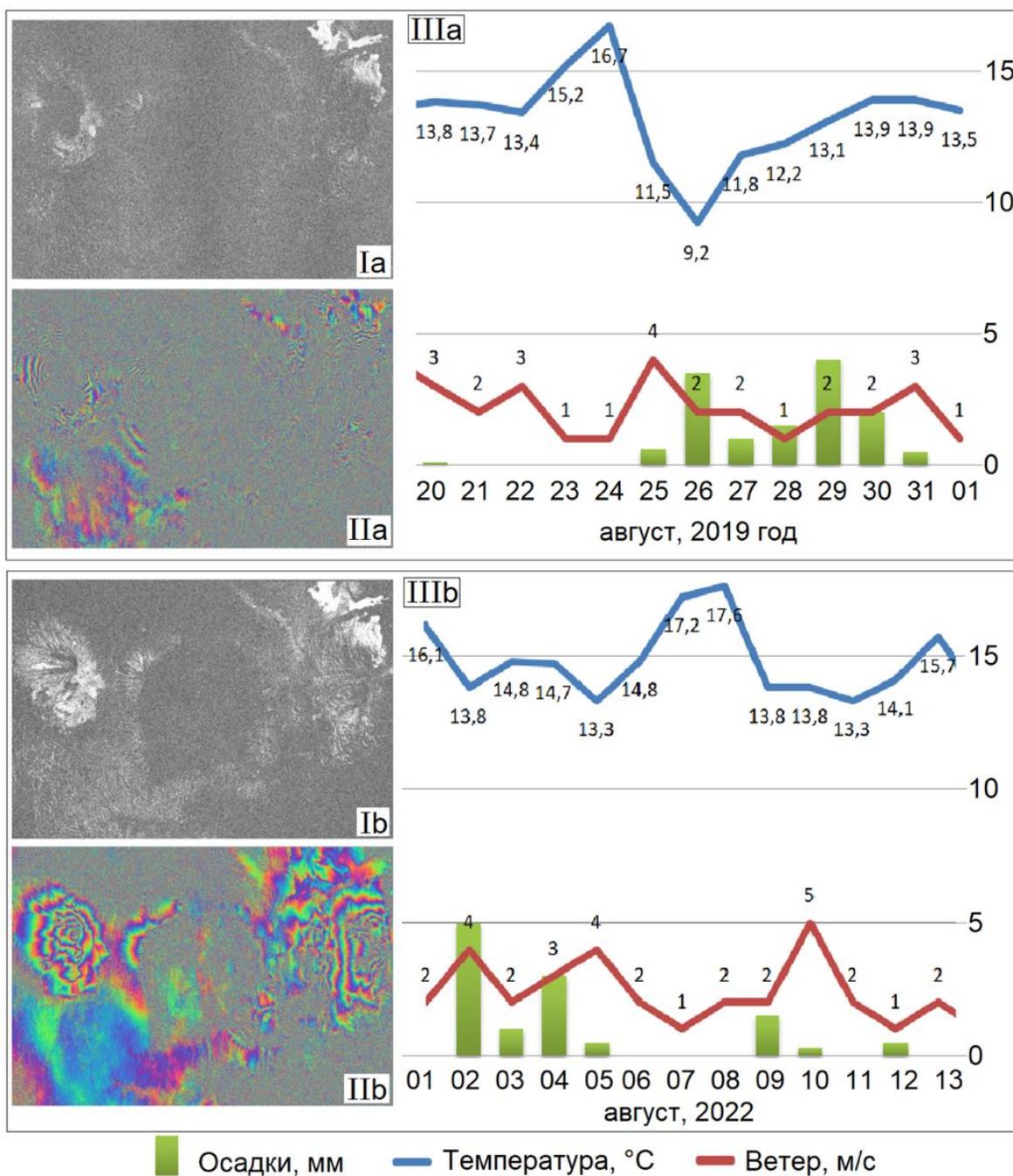


Рисунок 4.6. Сопоставление изображений когерентности (I), интерферограмм (II) и графиков изменения метеорологических параметров (III): а) низкая когерентность у пары 20.08.2019 и 01.09.2019, б) приемлемая когерентность у пары 01.08.2022 и 13.08.2022

4.4 Расчет смещений земной поверхности и анализ полученных результатов⁹

Одним из основных этапов обработки РСИ является удаление топографической составляющей фазы, после которого и получается дифференциальная интерферограмма (см. рис. 4.5 в). Для формирования топографической составляющей были привлечены глобальные ЦМР разного пространственного разрешения и точности. Поскольку на качество дифференциальной интерферограммы точность ЦМР оказывает прямое влияние, было проведено сравнение нескольких общедоступных ЦМР: SRTM 3Sec, CopernicusDEM, ArcticDEM и SRTM 1Sec путем формирования с их использованием дифференциальных интерферограмм (рис. 4.7).

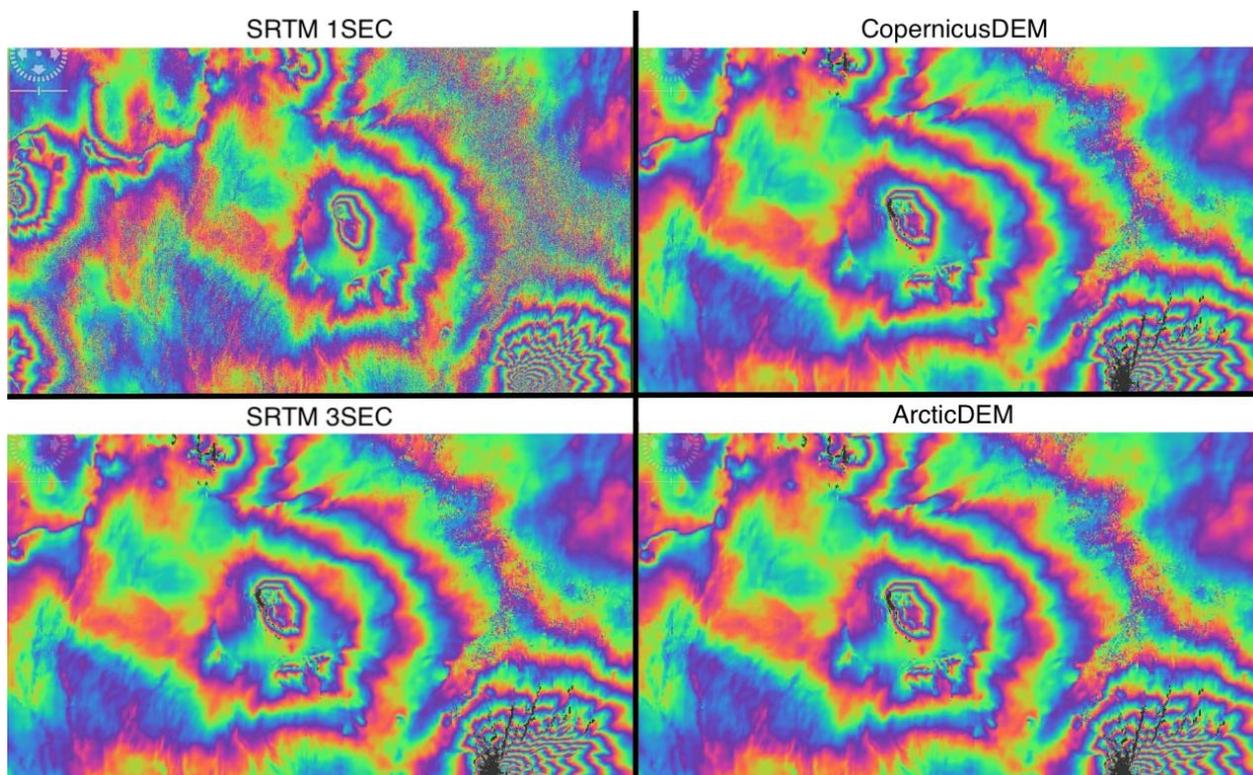


Рисунок 4.7. Сравнение дифференциальных интерферограмм, полученных при удалении топографической фазы с использованием разных ЦМР

⁹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Ширшова В.Ю., Балдина Е.А., Лебедева Е.В. Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — №4. — С. 133-146.

Проведенное сравнение дало основание выбрать SRTM 1Sec, т.к. визуально оценено наименьшее количество разрывов интерференционных полос. Каждый разрыв на интерферограмме выглядит как черный промежуток, что соответствует отсутствию информации. Впоследствии при работе математического алгоритма это может привести к ложным смещениям.

Для уменьшения шума выполнено некогерентное накопление с последующей фильтрацией. Чтобы не ухудшать качество изображений, использовались минимально возможные окна фильтров – 3x3.

Развертка фазы выполнялась методом *SNAPHU*. Затем произведен пересчет в LOS-смещения и геокодирование результата дифференциальной интерферометрической обработки. Так были получены информационные продукты – карты смещений, где опорными снимками выступили 18.08.2017 и 30.08.2017. Для всех пар были программно рассчитаны пространственные базовые линии, представленные в табл. 4-4 для каждого из опорных снимков.

Таблица 4-4. Величины пространственной и временной базовых линий для пар с опорными снимками а) 18.08.2017 и б) 30.08.2017

а) №	18.08.2017	Пространствен- ная база, м	Времен- ная база, дни	б) №	30.08.2017	Пространствен- ная база, м	Времен- ная база, дни
1	30.08.2017	14,33	12	1	25.08.2018	25,44	360
2	25.08.2018	11,67	372	2	06.09.2018	55,70	372
3	06.09.2018	41,51	384	3	27.07.2019	17,43	696
4	27.07.2019	31,40	708	4	20.08.2019	42,98	720
5	20.08.2019	28,79	732	5	21.08.2021	103,10	1452
6	21.08.2021	88,98	1464	6	04.08.2022	14,71	1800
7	04.08.2022	5,77	1812	7	09.09.2022	193,64	1836
8	09.09.2022	179,48	1848				

Из опыта применения дифференциальной интерферометрии в исследованиях подвижек земной поверхности в урбанизированных

территориях, ранее проведенных автором в 2018-2019 годах, было на практике проверено, что принципиально важным баллистическим ограничением является малая величина пространственной базовой линии (Ширшова, 2020). Для всех пар, приведенных в таблице 4-3 были сформированы дифференциальные интерферограммы и выполнен пересчет в LOS-смещения (рис. 4.8).

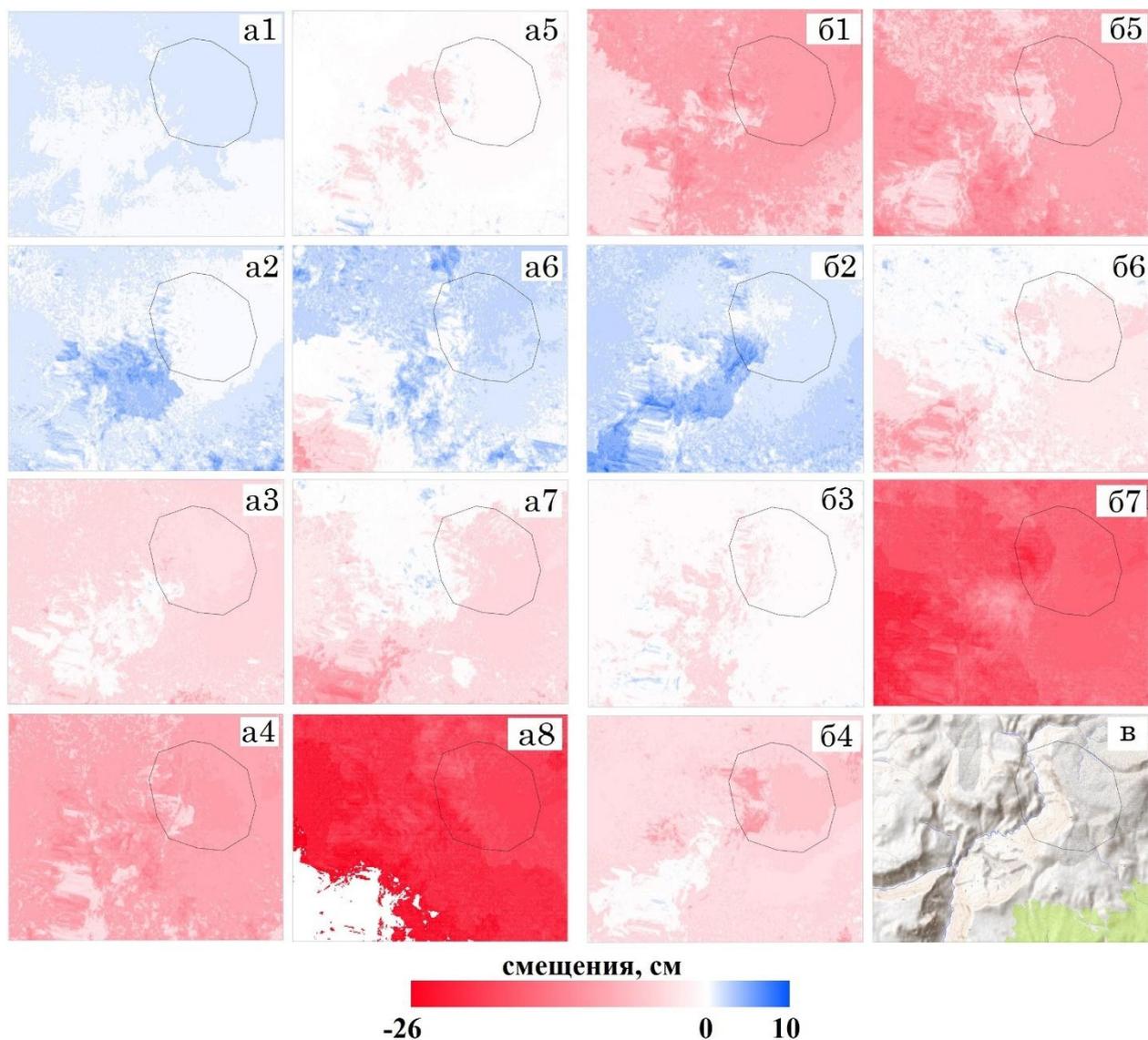


Рисунок 4.8. LOS-смещения рассчитанные для пар из таблицы 4-3: а – опорный снимок 18.08.2017; б - 30.08.2017; в – OpenStreetMap (исследуемая территория нанесена контуром на все изображения)

Сопоставление визуализации смещений с величиной базовой линии (см. табл. 4-3) наглядно демонстрирует, каков вклад большой пространственной базы при дифференциальной интерферометрии – а8 и б7 с базами 179,48 м и 193,64 м соответственно категорически исключаются из

дальнейшей обработки. А изображения с минимальными базами – а7 и б6 до 15 м похожи между собой. На изображениях смещений также с малыми базами а1 – смещений как таковых скорее нет (порядка мм, до 2 см поднятия). Изображения а2 и б2 также близки между собой и одинаковы по временной базе, но также не отображают значимых смещений. Итак, анализ рассчитанных значений базовых линий для всех выбранных пар (см. табл. 4-3) и визуализация LOS-смещений (см. рис. 4-8) позволяет выбрать пару, удовлетворяющую двум основным условиям: минимально возможная величина пространственной базовой линии и максимальная – временной. Таким условиям отвечает пара 18.08.2017 и 04.08.2022 с базовой линией в 5,77 м (см. рис. 4-8 а7).

В условиях городских территорий, где большое число постоянных отражателей: крыши зданий, дорожная инфраструктура и другие металлические сооружения, высокие значения когерентности пар достигаются гораздо чаще и проявление незначительных изменений погоды не так чувствительно на изображениях когерентности. Как правило, заметны сильные перепады температур и выпадение большого количества осадков, что, по сути, минимизирует роль физико-географических характеристик местности, оставляя лишь важность баллистических параметров КА – минимальная пространственная базовая линия. Абсолютно противоположная ситуация складывается для отдаленных природных территорий, где практически нет устойчивых отражателей. В этом случае на передний план выходит анализ физико-географических характеристик территории: рельефа, растительности, погоды и климата, который является определяющим фактором выбора пар РЛИ.

Анализ полученных смещений

Проверка правильности, достоверности результатов обработки снимков, анализ получаемых смещений необходимы всегда при дифференциальной интерферометрии ввиду того, что программные алгоритмы работают автоматически и не могут учесть физико-

географические особенности исследуемой местности. Наиболее точным методом анализа служат полевые наблюдения и измерения, однако они проводятся, как правило, только на техногенных объектах. При чрезвычайных ситуациях в условиях труднодоступных отдаленных территорий чаще всего такой возможности нет, тогда проводится визуальная оценка. Инструментами визуального анализа является вся доступная пространственная информация об объекте исследования: снимки в видимом диапазоне, топографическая карта местности и физико-географические описания. Все эти материалы служат источником оценки достоверности полученной информации о подвижках.

В случае Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии удалось выявить ряд неправильных определений подвижек и внести поправки – были удалены ложные смещения, рассчитанные на участках рек и озер, как очевидно невозможные. Получение смещений на водных объектах обусловлено низкой точностью ЦМР, участвующей в удалении топографической фазы, на которой не учтены озера и реки. Это может быть следствием низкого пространственного разрешения самой ЦМР, либо ее неактуальности отображения прежнего состояния территории. Другим подходом к минимизации ложных смещений может быть предварительный анализ ЦМР, ее уточнение и внесение актуальных изменений. Такой подход в условиях Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии не представлялся возможным по причине отсутствия локальных ЦМР на интересующие участки местности, либо инструментальных точек определений.

В итоге по выбранной интерферометрической паре снимков, полученных 18.08.2017 и 04.08.2022, пространственное распределение смещений составило от -15 до +7 см, эта информация приведена на рис. 4.9.

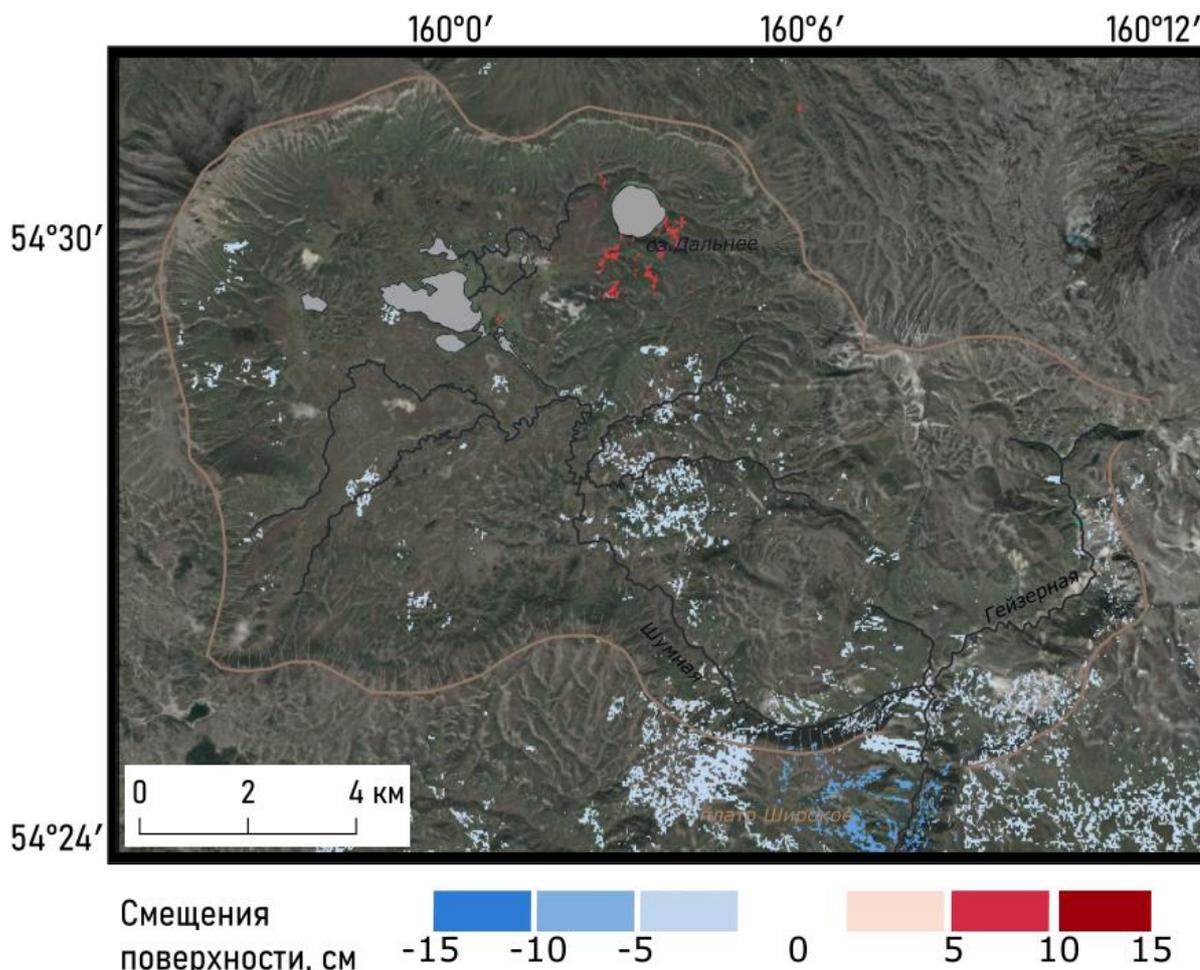


Рисунок 4.9. Изменения высоты земной поверхности за период с 18.08.2017 по 04.08.2022 в пределах Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии

Участки подъема до +7 см обнаружены в северной части кальдеры Узон южнее маара оз. Дальнее. Устойчивое поднятие этого участка может означать либо начало формирования нового центра вулканической активности, либо активизацию северной оконечности экструзии сопки Белой. Но в любом случае необходимы дальнейшие наблюдения и анализ результатов съемки последующих лет.

Незначительные опускания зафиксированы в районах южного и юго-восточного обрамлений Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии, в частности на плато Широком, где (Zelenin et al., 2020) были обнаружены многочисленные следы позднеголоценовой сейсмической активности со смещениями по разломам до 20 см за одно событие. Наиболее активные отрицательные смещения (до -15 см) выявлены в долине р. Шумной ниже впадения р. Гейзерной, в том числе на участках осыпей, для которых

смещение материала вниз по склону – обычный многолетний процесс. Таким образом, получена карта смещений земной поверхности, произошедших за период с 18.08.2017 по 04.08.2022. На территории Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии показаны положительные и отрицательные относительно линии прямой видимости РСА смещения от +7 до -15 см.

Этот итоговый информационный продукт был получен по материалам со спутника Sentinel-1B с нисходящей орбиты, при углах визирования от 30° до 36° при максимально похожих погодных условиях во время съемок при величине базовой линии 5,77 м и временной базе 1812 дней.

На территории Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии радиолокационным методом ранее уже проводилось исследование деформаций. На участке, исследованном (*Lundgren, Lu, 2006*) по данным RADARSAT-1 около 20 лет назад значительные деформации отсутствуют. Локально здесь, как и в районе сопки Желтой, в 2017-2022 гг., фиксируются незначительные отрицательные смещения (см. рис. 4.7). Возможно, происходят медленные процессы разнонаправленной геодинамической активизации исследуемого района, которая подлежит дальнейшему изучению и обоснованию. Например, уточнение результатов возможно при наличии более точной ЦМР для вычитания топографической составляющей при формировании дифференциальной интерферограммы. Для дальнейших исследований смещений на территории Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии перспективно определение смещений в полученном полигоне по восходящей орбите и при других углах визирования, а также обработка при использовании более актуальной информации о рельефе – более современных ЦМР.

4.5 Порядок реализации методики учета физико-географических факторов и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии

Составленная блок-схема показывает порядок действий, необходимых для получения корректных результатов при определении смещений земной

поверхности методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии природной территории (рис. 4.10).

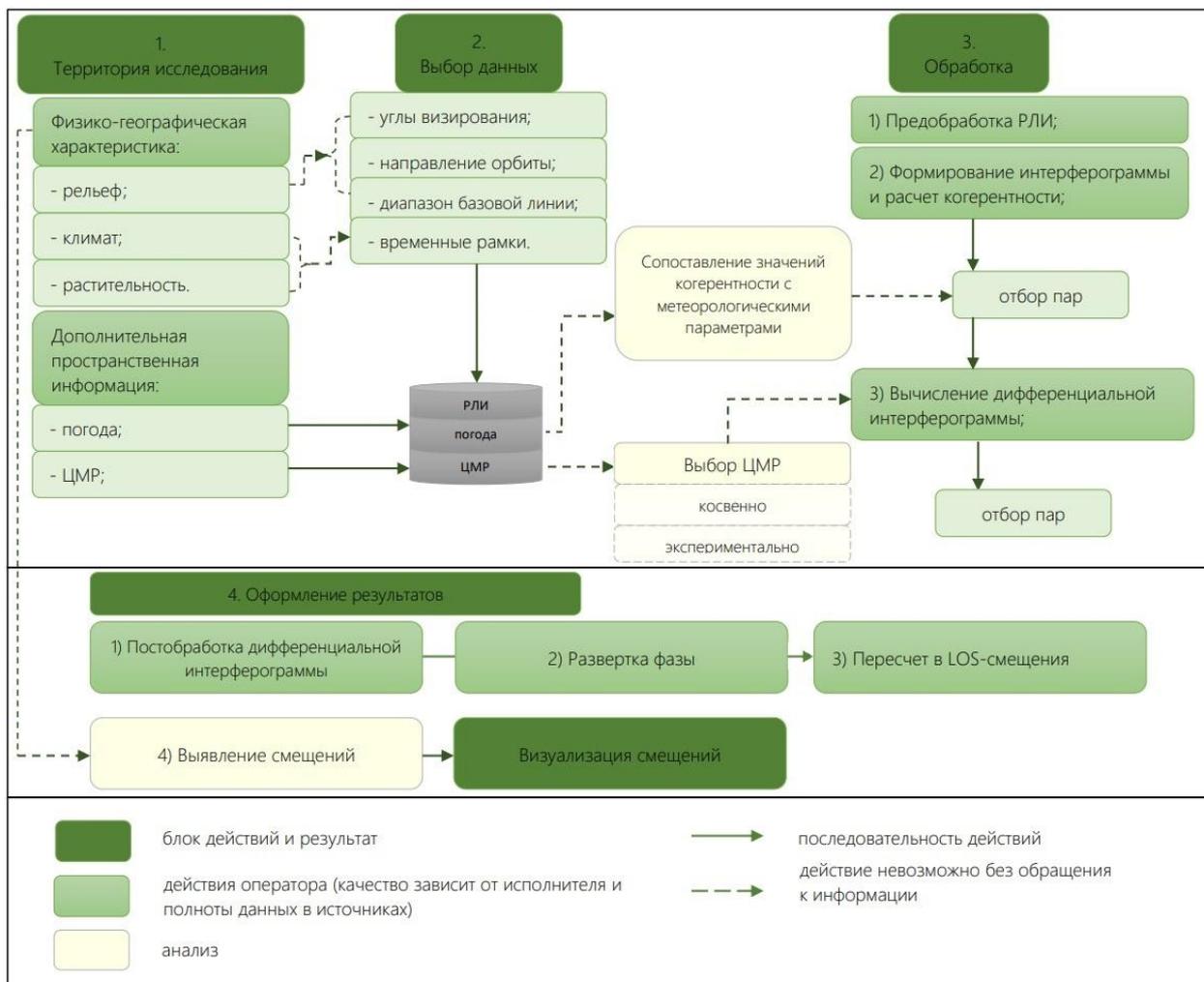


Рисунок 4.10. Блок-схема методики оценки характеристик и состояния местности при дифференциальной интерферометрии

Первый этап методики представляет собой формирование базы данных для последующей обработки и анализа. Изучаются основные физико-географические характеристики – собираются информация о рельефе, климате и растительности. Особое внимание при сборе физико-географической информации уделяется процессам, приводящим к подвижкам земной поверхности и изменениям характеристик растительного покрова. На первом шаге осуществляется также сбор дополнительной пространственной информации: ЦМР и метеорологических параметров (осадки, температура воздуха, скорость ветра).

На основании анализа основных физико-географических характеристик на втором этапе выбираются зависящие от них параметры изображений: углы визирования при съемке, направление орбиты, диапазон базовой линии и временной охват исследования (см. раздел 2.1).

На третьем этапе проводится дифференциальная интерферометрическая обработка, подробно изложенная в разделе 4.3 (см. рис. 4.5). Важным является этап сопоставления метеоданных и значений когерентности, учет изменений погоды накануне съемки. Как было установлено, это позволяет отобрать только потенциально корректные информационные интерферометрические продукты. Выбор ЦМР, при условии такой возможности, можно проводить двумя способами: косвенно, учитывая актуальность, точность формирования и экспериментально – как это было реализовано на примере Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии (см. рис. 4.7).

Финальный этап – оформление полученных результатов. В случае обработки нескольких многовременных пар проводится сопоставление их по пространственной и временной базе. Корректировка заведомо ложных смещений осуществляется на основании собранных физико-географических характеристик местности и возможных прецедентов опусканий и поднятий земной поверхности на полигоне исследования.

Выводы к главе 4

1. Получение корректных результатов изменения высоты земной поверхности при применении метода двухпроходной дифференциальной интерферометрии возможно при выборе исходных данных с учетом природных условий местности и текущего состояния поверхности.
2. Стабильность благоприятных погодных условий не только в момент съемки, но и накануне – за несколько дней до съемки, является одним из основных фильтров отбора данных для интерферометрической обработки. К благоприятным погодным условиям во время съемки относится, прежде

всего, отсутствие осадков и ветра, а также стабильные температурные показатели – без резких перепадов. При этом точность метеорологических сведений, часто ограниченная в силу отсутствия метеорологических наблюдений на территории исследования, допускает некоторую погрешность в рамках 1–2 градусах Цельсия по температуре.

3. Применение разработанной методики учета физико-географических факторов и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии на территории Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии с использованием радиолокационных данных со спутника Sentinel-1 позволила обнаружить незначительное изменение высоты земной поверхности, произошедшее в период с 18.08.2017 по 04.08.2022.

Заключение

В диссертационном исследовании на основе радиолокационных данных ДЗЗ разработаны методики применения информационных продуктов радиолокационной спутниковой интерферометрии в географических исследованиях. На примере исследования сезонной изменчивости и картографирования природно-территориальных единиц о. Визе сформирована методика получения МТС композита и последующего его применения для мониторинга изменчивости поверхности острова и дешифрирования ПТК. Также разработана методика мониторинга смещений в природных территориях с учетом характеристик местности и метеорологической обстановки на примере Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии. Согласно цели данного исследования и защищаемым положениям, были сделаны следующие выводы:

Радиолокационная спутниковая интерферометрия является незаменимым методом мониторинга состояния поверхности на отдаленных территориях. Мировой опыт применения и создания новых интерферометрических информационных продуктов в географических исследованиях обозначил, что наибольшее количество применений дистанционных интерферометрических методов приходится именно на труднодоступные и отдаленные территории, где просто необходим поиск новых подходов по мониторингу изменений во избежание ЧС и для актуализации современного состояния.

Мультивременной композит с когерентностью, ранее применявшийся только для мониторинга сельскохозяйственных районов, является новым видом геоизображений – самостоятельным информационным продуктом, применимым для выявления изменений и картографирования земной поверхности. Для картографирования природно-территориальных единиц арктических островов следует применять летние геоизображения МТС, при использовании которых и была создана первая карта природно-территориальных комплексов о. Визе. Для мониторинга сезонной

изменчивости возможно применение мультивременных композитов с когерентностью, сформированных по данным Sentinel-1 с 12-дневным интервалом между съемками в течение всего года.

Определение смещений поверхности на природных территориях методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии проводится с учетом условий местности и метеорологической обстановки до начала обработки радиолокационных изображений и в процессе анализа промежуточных информационных продуктов. Это позволило определить изменения высоты земной поверхности Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии спустя 20 лет после последних наблюдений методом дифференциальной интерферометрии.

Для радиолокационной интерферометрии одним из главных критериев отбора данных служит контроль стабильности благоприятных погодных условий в момент и – за несколько дней до съемки. В областях с сильной погодной изменчивостью длительность временного интервала между съемками играет ключевую роль при дифференциальной интерферометрической обработке данных. Благоприятные погодные условия включают отсутствие осадков и ветра, а также стабильные температурные показатели без резких колебаний.

На основе информационных продуктов, сформированных по данным спутника Sentinel-1, апробированы *две методики*: 1) применения мультивременных композитов с когерентностью для картографирования современного состояния малых арктических островов и в исследовании сезонной динамики их поверхности, 2) учета физико-географических факторов и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии на примере природной территории. Апробации выполнены для первой методики на территорию о. Визе, для второй – Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии. В создание карты природно-территориальных комплексов о. Визе были заложены перечисленные принципы работы с радиолокационными интерферометрическими данными,

а также привлечены снимки в оптическом диапазоне и другие доступные источники сведений о местности. Также и в случае выявленных изменений высоты земной поверхности – определение их локализации и генезиса может производиться только на основе физико-географических факторов.

Сформированные методики на основе данных спутника Sentinel-1 направлены на развитие методов радиолокационного ДЗЗ и их применение в географических исследованиях по результатам съемки отечественными космическими группировками «Кондор-ФКА» и «Обзор-Р». Их внедрение при изучении и мониторинге сезонных изменений отдаленных территорий России может служить основой для получения картографических материалов малых арктических островов и предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных подвижками земной поверхности. Перспективами дальнейшей работы для совершенствования разработанных методик может быть их автоматизация и расширение территорий для апробации.

Список литературы

1. Алексеев Г. В. Арктическое измерение глобального потепления //Лёд и снег. – 2014. – Т. 54. – №. 2. – С. 53-68.
2. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / А. В. Завадская, В. М. Яблоков, Д. М. Паничева и др. – М.: КРАСАНД. – 2015. – 88 с.
3. Бабокин М. И., Ефимов А. В., Зайцев С. Э., Карпов О. А., Костров В. В., Неронский Л. Б., Савосин Г. В., Титов М. П., Толстов Е. Ф., Турук В. Э., Цветков О. Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата "Кондор-Э" //Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. – 2016. – С. 16-36.
4. Бабокин М. И., Костюк Е. А., Бадак Л. А., Стёпин В. Г. Космические РСА-интерферометры детальной оценки рельефа местности с одновременным формированием парных сигналов //Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2022. – №. 1. – С. 5-13.
5. Бадак Л.А., Захаров А.И., Костюк Е.А., Ширшова В.Ю. Методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки с целью формирования цифровой модели рельефа земной поверхности // Сборник трудов X Всероссийской науч.-тех. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» – М.: АО «Российские космические системы», 2021. – С. 139-147.
6. Балдина Е. А. Использование многовременных радиолокационных снимков со спутников ERS, ENVISAT для изучения сезонных и многолетних изменений в дельте Волги //Геоинформатика. – 2005. – №. 2. – С. 3-11.
7. Балдина Е.А., Ширшова В.Ю., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю. Динамика береговой линии и состояния поверхности малых арктических островов (Визе и Ушакова) по разновременным оптическим и радиолокационным снимкам // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022, №1. – с.107-121.
8. Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Геологические позиции гидротермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. – 1983. – № 1. – С. 65-79.
9. Бондур В. Г., Захарова Л. Н., Захаров А. И., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Дагуров П. Н. Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров 1-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурья //Исследование Земли из космоса. – 2019. – №. 5. – С. 3-14.
10. Брайцева О. А., Флоренский И. В., Волынец О. Н. Вулкан Кихпинич // Активные вулканы Камчатки: в 2-х т. М.: Наука. –1991. –Т.2. – С.74–93
11. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук, В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – 2010. – С. 680

12. Верба В. С., Неронский Л. Б. и Турук В. Э. Перспективные технологии цифровой обработки радиолокационной информации космических РСА //Радиотехника. – 2019. – С. 415.
13. Визе В.Ю. Моря Советской Арктики: очерки по истории исследования / М.: Главсевморпути, 1948. – 396 с.
14. Визе В.Ю. Моря Советской Арктики: очерки по истории исследования / М.: Главсевморпути, 1939. – 568 с.
15. Виноградов А. Н., Елизаветин И. В., Куршев Е. П., Парамонов С. В., Белов С. А. Анализ применимости методов дифференциальной интерферометрии для задач геотехнического мониторинга Арктической зоны //Программные системы: теория и приложения. – 2018. – Т. 9. – №. 4 (39). – С. 461-475.
16. Виноградова Н.С., Сосновский А.В. Использование карт когерентности для повышения точности интерферограмм при обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой // Ural Radio Engineering J. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 67-80.
17. Волкова М. С., Хайретдинов С. А. Модель поверхности разрыва Хубсугульского землетрясения 12.01. 2021 по данным спутниковой РСА интерферометрии //Физика Земли. – 2022. – №. 1. – С. 83-89.
18. Дагуров П. Н., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Захаров А. И., Балтухаев А. К., Быков М.Е., Кирбижекова И. И. Радиолокационная дифференциальная интерферометрия L-диапазона для определения параметров снежного покрова //Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 5.
19. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии). // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 5. – С. 24-37.
20. Добрынин И. И., Песяк Ф. В., Савин А. И., Севастьянов Н. Н. Измерение смещений земной поверхности методом радиолокационной интерферометрии с применением уголкового отражателя радиосигнала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 113-121.
21. Добрынин И. И., Савин А. И., Севастьянов Н. Н. Исследование факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии с использованием уголкового отражателя // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. – Т. 15. – № 3. – С. 29-38.
22. Достовалов М.Ю., Трошко К.А. Экспериментальная оценка когерентности по амплитудным изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – №. 2. – С. 9-18.
23. Дибнер В.Д. Геоморфология островов и морского дна советского сектора Северного Ледовитого океана // Геология СССР. М.: Недра. – 1970. – Т. 26. – С. 405-431.

24. Егошкин Н. А., Еремеев В. В., Москвитин А. Э., Ушенкин В. А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли //М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2019. – Т. 320.
25. Елизаветин И. В., Зорин О. В., Коненко Н. В., Сысенко Д. В., Сысенко В. А., Чемякин Э. В. К вопросу о возможности применения радиолокационных снимков поверхности земли в горном производстве //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – №. 9. – С. 38-39.
26. Захаров А. И., Тугаринов П. В. Исследование динамики ледовых покровов побережья Антарктиды по данным интерферометрической съемки РСА" Алмаз-1" //Радиотехника. – 1998. – Т. 12. – С. 63.
27. Захаров И. А., Хренов Н. Н. Радиолокационные интерферометрические методы наблюдения Земли в задаче мониторинга подвижек газопроводов //Газовая промышленность. – 2004. – №. 3. – С. 44-48.
28. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли. Радиолокационное зондирование поверхности //М.: КРАСАНД. – 2012. – С. 248.
29. Захаров А.И. Методы дистанционного зондирования Земли радарми с синтезированной апертурой. Дисс. на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. – М.: ИРЭ РАН, 2013, 370 стр.
30. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Михайлюкова П. Г. Влияние атмосферы в исследованиях динамики рельефа Толбачинского дола методами радарной интерферометрии // Тр. 7-х Всерос. Армандовских чтений. М: Полигр. центр МИ ВлГУ, – 2017. – С. 68-73.
31. Захарова Л. Н., Захаров А. И. Возможности радиолокационной интерферометрии по данным С-диапазона для мониторинга медленных смещений поверхности на примере Бурейского оползня. – 2019.
32. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Синило В. П., Денисов П. В. Влияние атмосферы на исследования пересеченного рельефа методами радарной интерферометрии // Журн. радиоэлектроники. – 2023. – № 2. – С. 1684-1719.
33. Захваткина Н. Ю., Александров В. Ю., Коросов А. А., Йоханнесен О. М. Классификация морских льдов на РСА изображениях спутника ENVISAT //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6. – №. 1. – С. 373-379.
34. Калинов М. И., Родионов В. А. Опыт применения отечественных космических систем с радиолокаторами высокого разрешения для наблюдения за морскими объектами и гидрофизическими процессами в океане (к 25-летию запуска космического аппарата «Алмаз-1») //Труды всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (см. в книгах). – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук. – 2016. – №. 13. – С. 13-16.

35. Кантемиров Ю. И. Применение космических радарных съемок для задач тематического картографирования и мониторинга изменений //Сибирский аэрокосмический журнал. – 2013. – №. 5 (51). – С. 54-57.
36. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съемки //Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – №. 3. – С. 98-106.
37. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии //Информатика и автоматизация. – 2013. – №. 28. – С. 194-208.
38. Киселева Е. А., Михайлов В. О., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н. К вопросу мониторинга смещений земной поверхности методами радарной спутниковой интерферометрии //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – №. 5. – С. 122.
39. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. М.: Радио и связь. – 1983. – 224 с.
40. Костров В. В., Толстов Е. Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения //Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн. – 2017. – С. 76-113.
41. Костров В. В., Толстов Е. Ф., Храмов К. К. Свойства системы СДЦ моноимпульсного космического РСА по обнаружению движущихся целей //Всероссийские открытые Армандовские чтения. – 2019. – С. 362-370.
42. Котельников, В. А., Дубровин, В. М., Дубинский, Б. А., Кислик, М. Д., Кузнецов, Б. И., Лишин, И. В., Шаховской, А. М. Радиолокационные наблюдения Венеры в Советском //Доклады Академии наук СССР. – 1965. – №. 1.
43. Котельников В. А., Ржига О. Н., Александров Ю. Н., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Шаховской А. М., Францессон А. В. Развитие радиолокационных исследований планет в Советском Союзе //в сб. Проблемы современной радиотехники и электроники. – 1980. – С. 32.
44. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Сеницын В.И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестн. КРАУНЦ, Науки о Земле. – 2007. – № 2 (10). – С. 171-172.
45. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А. Особенности локальной сейсмичности Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии (Восточная Камчатка) //Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – 2009. – С. 93-98.
46. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Коновалова А.А. Локальная сейсмичность района Долины Гейзеров по данным полевых наблюдений 2008–2009 гг. // Вестн. КРАУНЦ, Науки о Земле. – 2010. – № 1 (15). – С. 90-99.
47. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Горбатилов А. В., Степанова М. Ю. Развитие модели района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии и вулкана Кихпиньч (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микросейсмического

- зондирования и локальной геодинамической активности //Физика Земли. – 2015. – №. 3. – С. 89-101.
48. Кривенко А. А., Кашников Ю. А. Исследования оседаний подработанной территории методом интерферометрии постоянных отражателей //Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2009. – №. 8. – С. 64-73.
49. Кузьмин Ю. О. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса //Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – №. 1. – С. 43-54.
50. Курошев Г. Д. Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования. Учебное пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. Ун-та, 2011. – С. 182
51. Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования. // Геоморфология. – 2020. – № 2. – С. 60-73.
52. Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А., Сугробов В.М., Сугрובה, Н.Г., Зубин, М.И. Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Активные вулканы Камчатки: в 2-х т. М.: Наука. – 1991. –Т.2. – С.94-141
53. Леонов В.Л. Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров, Камчатка // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: в 2 т., труды региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. – 2008. – Т.1. – С. 91-95.
54. Мельников Н. Н., Калашник А. И. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики //Арктика: экология и экономика. – 2015. – №. 3. – С. 19.
55. Михайлюкова П.Г., Захаров А.И., Захарова Л.Н. Районирование Толбачинского Дола на основе значений когерентности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №. 2. С. 85-98.
56. Нешатаева В. Ю., Пестеров А. О. Структура растительного покрова кальдеры Узон (Восточная Камчатка) //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №. 1-4. – С. 1080-1083.
57. Нугманов И. И., Чернова И. Ю. Информативность методов радиолокационной интерферометрии для оценки современных движений земной коры в нефтедобывающих районах Республики Татарстан //Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – №. 2. – С. 133-141.
58. Огородов С. А., Шабанова Н. Н., Кессель А. С., Баранская А. В., Разумов С. О. Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей

Российской Арктики //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2022. – №. 1. – С. 26-42.

59. Петров А. С., Чиков В. А., Волченков А. С. Обзор методов и алгоритмов продольной интерферометрии для селекции и оценки параметров движущихся целей с помощью космических РСА //Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2021. – №. 1. – С. 33-43.

60. Пиетранера Л., Чезарано Л., Бритти Ф., Джентиле В., Кантемиров Ю.И. Новый продукт МТС, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed // Геоматика. 2012. №. 1. С. 46-51.

61. Романенко Ф. А. Строение и динамика рельефа островов Карского моря //Динамика Арктических побережий России. М.: Географический ф-т МГУ. – 1998. – С. 131-153.

62. Романенко Ф.А. Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых (по материалам наблюдений полярных станций). Геоморфология. 2008, № 1, С. 56-64.

1. Романенко Ф. А., Харченко С. В. К истории геоморфологического картографирования Арктики //Геоморфология и палеогеография. – 2022. – Т. 53. – №. 1. – С. 3-25.

63. Ромашенко О.Г. Геоморфологическая карта. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т-41–44 (мыс Желания). Объяснительная записка / СПб.: МАГЭ-ПМГРЭ, 2013. – 200 с.

64. Сафронова И.Н, Ходачек Е. А. О флоре и растительности островов Андрея, Уединения и Визе (Северный Ледовитый океан) // Ботанический журнал., 1989 г., т. 74, № 7. – с. 1003–1011.

65. Соломатин В.И., Жигарев Л.А., Совершаев В.А. Криогенные процессы и явления на побережье и шельфе Арктических морей // Динамика Арктических побережий России. М.: Географический ф-т МГУ, – 1998. – с. 12-18.

66. Сугробов В.М. Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров: Научно-популярный очерк, путеводитель. / В. М. Сугробов, Н. Г. Сугрובה, В. А. Дроздин, Г. А. Карпов, В. Л. Леонов – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. – 2009. –108 с.

67. Тимофеева В. А. Применение методов РСА-интерферометрии для исследования сейсмических событий в районе полуострова Камчатка и Командорских островов : дис. – ИФЗ РАН, 2022.

68. Тишков А. А., Кренке А. Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения //Арктика: экология и экономика. – 2015. – Т. 20. – №. 4. – С. 28.

69. Устинова Т.И. Камчатские гейзеры. / Отв. ред. Г. Д. Рихтер, В. В. Никольская – М.: Географгиз. – 1955. –120 с.

70. Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы, утвержденной постановлением Правительства РФ №230 от 23 марта 2016 года.

71. Чебров Д. В., Чеброва А.Ю., Матвеев Е.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В. Гусев А.А., Салтыков В.А., Воропаев П.В. Камчатка и Командорские острова //Землетрясения Северной Евразии. – 2019. – №. 22 (2013). – С. 198-213.
72. Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Технология совместного анализа временных рядов изображений интерферометрической когерентности Sentinel-1 и вегетационного индекса по данным Sentinel-2 для мониторинга сельскохозяйственных полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №. 4. С. 61-72.
73. Ширшова В.Ю. Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2019. — №4. — С. 399-408.
74. Ширшова В. Ю., Балдина Е. А. Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – №. 4. – С. 79-91.
75. Ширшова В. Ю., Балдина Е. А., Лебедева Е.В. Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С.133-146.
76. Школьный Л. А., Толстов Е. Ф., Детков А. Н., Карпов О. А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений //Под ред. ЛА Школьного.-М.: изд. ВВИА им. проф. НЕ Жуковского. – 2008. – Т. 531.
77. Энтин А. Л., Михайлюкова П. Г., Кедич А. И., Харченко С. В. Современный опыт использования радиолокационной интерферометрии для регистрации изменений высотных отметок поверхности суши //Геоморфология и палеогеография. – 2022. – №. 2. – С. 27-42.
78. Яковлев Е. К., Блатов И. А. Моделирование параметров движения центра масс космического аппарата и методы обработки //Вестник Самарского государственного университета. – 2013. – №. 6 (107). – С. 147-152.
79. Alpers W. R., Ross D. B., Rufenach C. L. On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1981. – Т. 86. – №. С7. – С. 6481-6498.
80. Alam M. S., Kumar D., Chatterjee R. S. Improving the capability of integrated DInSAR and PSI approach for better detection, monitoring, and analysis of land surface deformation in underground mining environment //Geocarto International. – 2022. – Т. 37. – №. 12. – С. 3607-3641.

81. Amarsaikhan D., Ganzorig M., Ache P., Blotvogel H. The integrated use of optical and InSAR data for urban land-cover mapping //International Journal of Remote Sensing. – 2007. – T. 28. – №. 6. – C. 1161-1171.
82. Arangio S., Calò F., Di Mauro M., Bonano M., Marsella M., Manunta M. An application of the SBAS-DInSAR technique for the assessment of structural damage in the city of Rome //Structure and Infrastructure Engineering. – 2014. – T. 10. – №. 11. – C. 1469-1483.
83. Aslan G., Fomelis M., Raucoules D., De Michele M., Bernardie S., Cakir Z. Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French Alps //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 8. – C. 1305.
84. Appleton E. V. Two anomalies in the ionosphere //Nature. – 1946. – T. 157. – №. 3995. – C. 691-691.
85. Arai H., Le Toan T., Takeuchi W., Oyoshi K., Fumoto T., Inubushi K. Evaluating irrigation status in the Mekong Delta through polarimetric L-band SAR data assimilation //Remote Sensing of Environment. – 2022. – T. 279. – C. 113139.
86. Baldina E.A., Shirshova V.Yu., Zhdanova E.Yu. Characteristics of the Small Arctic Island of Vise (Kara Sea) Basing on 2019 Multi-season Sentinel-1 Data // EC&ESA EO for Polar Science Workshop, – 2020.
87. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z., Lilly P. A modification to the Goldstein radar interferogram filter //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – T. 41. – №. 9. – C. 2114-2118.
- Bartsch A., Pointner G., Ingeman-Nielsen T., Lu W. Towards Circumpolar Mapping of Arctic Settlements and Infrastructure Based on Sentinel-1 and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2020. T. 12. №. 15. C. 2368.
88. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms //IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2002. – T. 40. – №. 11. – C. 2375-2383.
89. Bekaert D. P. S., Hooper A., Wright T. J. A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2015. – T. 120. – №. 2. – C. 1345-1356.
90. Bekaert D. P. S., Hooper A., Wright T. J. Reassessing the 2006 Guerrero slow-slip event, Mexico: Implications for large earthquakes in the Guerrero Gap //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2015. – T. 120. – №. 2. – C. 1357-1375.
91. Bekaert D. P. S., Walters R. J., Wright T. J., Hooper A. J., Parker D. J. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques //Remote Sensing of Environment. – 2015. – T. 170. – C. 40-47.
92. Buckley S. M., Rossen P. A., Persaud P. ROI_PAC documentation-repeat orbit interferometry package //JET Propulsion Lab., Pasadena, CA. – 2000.
93. Bonano M., Calò F., Manunta M., Marsella M. The SBAS-DInSAR technique: A tool for deformation monitoring in the urban damage assessment //Life-Cycle and Sustainability of Civil

- Infrastructure Systems: Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE'12), Vienna, Austria, October 3-6, 2012. – CRC Press, 2012. – C. 395.
94. Bonano M., Manunta M., Marsella M., Lanari R. Long-term ERS/ENVISAT deformation time-series generation at full spatial resolution via the extended SBAS technique //International Journal of Remote Sensing. – 2012. – T. 33. – №. 15. – C. 4756-4783.
95. Bonano M., Manunta M., Pepe A., Paglia L., Lanari R. From previous C-band to new X-band SAR systems: Assessment of the DInSAR mapping improvement for deformation time-series retrieval in urban areas //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – T. 51. – №. 4. – C. 1973-1984.
96. Borgia A., Tizzani P., Solaro G., Manzo M., Casu F., Luongo G., Pepe A., Berardino P., Fornaro G., Sansosti E., Ricciardi G.P., Fusi N., Di Donna G., Lanari R. Volcanic spreading of Vesuvius, a new paradigm for interpreting its volcanic activity //Geophysical Research Letters. – 2005. – T. 32. – №. 3.
97. Cao Y., Li Z., Wei J., Hu J., Duan M., Feng G. Stochastic modeling for time series InSAR: with emphasis on atmospheric effects //Journal of Geodesy. – 2018. – T. 92. – C. 185-204.
98. Cao Y., Li Z., Amelung F. Mapping ground displacement by a multiple phase difference-based InSAR approach: with stochastic model estimation and turbulent troposphere mitigation //Journal of Geodesy. – 2019. – T. 93. – C. 1313-1333.
99. Cao Y., Jónsson S., Li Z. Advanced InSAR tropospheric corrections from global atmospheric models that incorporate spatial stochastic properties of the troposphere //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2021. – T. 126. – №. 5. – C. e2020JB020952.
100. Campbell B. A. Radar remote sensing of planetary surfaces. – Cambridge University Press, 2002. – C. 350.
101. Carpenter R. L., Goldstein R. M. Radar observations of Mercury //Science. – 1963. – T. 142. – №. 3590. – C. 381-382.
102. Casu F., Elefante S., Imperatore P., Zinno I., Manunta M., De Luca C., Lanari R. SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2014. – T. 7. – №. 8. – C. 3285-3296.
103. Cigna F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E., Dixon T. H., Ávila-Olivera J. A., Garduño-Monroy V. H., DeMets Ch., Wdowinski S. Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico //Remote Sensing of Environment. – 2012. – T. 117. – C. 146-161.
104. Cigna F., Tapete D. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR //Remote Sensing of Environment. – 2021. – T. 253. – C. 112161.
105. Chang H. C., Ge L., Rizos C., Milne T. Validation of DEMs derived from radar interferometry, airborne laser scanning and photogrammetry by using GPS-RTK //IGARSS

2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2004. – T. 5. – C. 2815-2818.
106. Chen C. W., Zebker H. A. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2002. – T. 40. – №. 8. – C. 1709-1719.
107. Chen S. W., Wang X. S., Xiao S. P. Urban damage level mapping based on co-polarization coherence pattern using multitemporal polarimetric SAR data //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – T. 11. – №. 8. – C. 2657-2667.
108. Dai K., Deng J., Xu Q., Li Z., Shi X., Hancock C., Wen N., Zhang L., Zhuo G. Interpretation and sensitivity analysis of the InSAR line of sight displacements in landslide measurements //GIScience & Remote Sensing. – 2022. – T. 59. – №. 1. – C. 1226-1242.
109. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system //Quarterly Journal of the royal meteorological society. – 2011. – T. 137. – №. 656. – C. 553-597.
110. Delacourt C., Briole P., Achache J. A. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna //Geophysical Research Letters. – 1998. – T. 25. – №. 15. – C. 2849-2852.
111. Dobson M. C., Ulaby F. T., Pierce L. E. Land-cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic aperture radar //Remote sensing of Environment. – 1995. – T. 51. – №. 1. – C. 199-214.
112. Doin M.-P., Lasserre C., Peltzer G., Cavalié O., Doubre C. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models //Journal of Applied Geophysics. – 2009. – T. 69. – №. 1. – C. 35-50.
113. Dong J., Zhang L., Liao M., Gong J. Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring //Remote Sensing of Environment. – 2019. – T. 233. – C. 111370.
114. Donezar U., De Blas T., Larrañaga A., Ros F., Albizua L., Steel A., Broglia M. Applicability of the multitemporal coherence approach to sentinel-1 for the detection and delineation of burnt areas in the context of the copernicus emergency management service //Remote Sensing. – 2019. – T. 11. – №. 22. – C. 2607.
115. Devaraj S., Yarrakula K. Assessment of topographical and atmospheric errors in Sentinel 1 derived DInSAR //Geocarto International. – 2022. – T. 37. – №. 8. – C. 2424-2440.
116. De Zan F., Guarnieri A. M. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans //IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2006. – T. 44. – №. 9. – C. 2352-2360.

117. De Macedo K. A., Coccia A., Meta A., Placidi S. MetaSensing Airborne InSAR Systems for DEM Generation: Results from X, C, P-Band Campaigns //2021 7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). – IEEE, 2021. – C. 1-4.
118. Ding X., Li Z. W., Zhu J. J., Feng G. C., Long J. P. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation //Sensors. – 2008. – T. 8. – №. 9. – C. 5426-5448.
119. Earth Observing System SAR Instrument Panel Report. Volume IIF. – NASA, Wash., D.C., 1988.
120. Eineder M. Efficient simulation of SAR interferograms of large areas and of rugged terrain //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – T. 41. – №. 6. – C. 1415-1427.
121. Engdahl M. E., Hyyppa J.M. Land-cover classification using multitemporal ERS-1/2 InSAR data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. T. 41. №. 7. C. 1620-1628.
122. Fan H., Wang L., Wen B., Du S. A new model for three-dimensional deformation extraction with single-track InSAR based on mining subsidence characteristics //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2021. – T. 94. – C. 102223.
123. Fattahi H., Simons M., Agram P. InSAR time-series estimation of the ionospheric phase delay: An extension of the split range-spectrum technique //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – T. 55. – №. 10. – C. 5984-5996.
124. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry //IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2001. – T. 39. – №. 1. – C. 8-20.
125. Ferretti A., Monti Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonet D. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. – 2007. – T. 19.
126. Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR //IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2011. – T. 49. – №. 9. – C. 3460-3470.
127. Ferretti A. Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space (EET 9). – Earthdoc, 2014. – C. 160.
128. Fielding E. J., Blom R. G., Goldstein R. M. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry //Geophysical research letters. – 1998. – T. 25. – №. 17. – C. 3215-3218.
129. Fernàndez J., Tizzani P., Manzo M., Borgia A., Gonza`lez P.J., Mart`ı J., Pepe A., Camacho A.G., Casu F., Berardino P., Prieto J.F., Lanari R. Gravity-driven deformation of Tenerife measured by InSAR time series analysis. – 2009.
130. Franceschetti G., Lanari R. Synthetic aperture radar processing. – CRC press, 1999.
131. Foster J., Brooks B., Cherubini T., Shacat C., Businger S., Werner C. L. Mitigating atmospheric noise for InSAR using a high resolution weather model //Geophysical Research Letters. – 2006. – T. 33. – №. 16.

132. Fischer G., Papathanassiou K. P., Hajnsek I. Modeling and compensation of the penetration bias in InSAR DEMs of ice sheets at different frequencies //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2020. – T. 13. – C. 2698-2707.
133. Gabriel A. K., Goldstein R. M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B //International Journal of Remote Sensing. – 1988. – T. 9. – №. 5. – C. 857-872.
134. Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1989. – T. 94. – №. B7. – C. 9183-9191. Gagliardi V., Tosti F., Bianchini Ciampoli L., Battagliere M. L., D'Amato L., Alani A. M., Benedetto A. Satellite remote sensing and non-destructive testing methods for transport infrastructure monitoring: advances, challenges and perspectives //Remote Sensing. – 2023. – T. 15. – №. 2. – C. 418.
135. Gernhardt S., Adam N., Eineder M., Bamler R. Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas //Annals of GIS. – 2010. – T. 16. – №. 2. – C. 103-111.
136. Gernhardt S., Bamler R. Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI //ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. – 2012. – T. 73. – C. 68-79.
137. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., Silva A. M., Gu W., Kim G-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) //Journal of climate. – 2017. – T. 30. – №. 14. – C. 5419-5454.
138. Gray A. L., Mattar K. E., Sofko G. Influence of ionospheric electron density fluctuations on satellite radar interferometry //Geophysical Research Letters. – 2000. – T. 27. – №. 10. – C. 1451-1454.
139. Graham L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping //Proceedings of the IEEE. – 1974. – T. 62. – №. 6. – C. 763-768.
140. Gomba G., Parizzi A., De Zan F., Eineder M., Bamler R. Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – T. 54. – №. 3. – C. 1446-1461.
141. Guzzetti F., Manunta M., Ardizzone F., Pepe A., Cardinali M., Zeni G., Reichenbach P., Lanari R. Analysis of ground deformation detected using the SBAS-DInSAR technique in Umbria, Central Italy //Pure and applied geophysics. – 2009. – T. 166. – C. 1425-1459.
142. Goldstein R. M., Gillmore W. F. Radar observations of Mars //Science. – 1963. – T. 141. – №. 3586. – C. 1171-1172.
143. Goldstein R. M. Radar investigations of the planets //IEEE Transactions on Military Electronics. – 1964. – T. 8. – №. 3. – C. 199-206.

144. Goldstein R. M. Radar observations of Jupiter //Science. – 1964. – T. 144. – №. 3620. – C. 842-843.
145. Goldstein R. M., Zebker H. A., Barnett T. P. Remote sensing of ocean currents //Science. – 1989. – T. 246. – №. 4935. – C. 1282-1285.
146. Goldstein R. M., Werner C. L. Radar interferogram filtering for geophysical applications //Geophysical research letters. – 1998. – T. 25. – №. 21. – C. 4035-4038.
147. Han W. et al. A polarimetric projection-based scattering characteristics extraction tool and its application to PolSAR image classification //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2023. – T. 202. – C. 314-333.
148. Haiden T., Janousek M., Bidlot J., Buizza R., Ferranti L., Prates F., Vitart F. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2018 upgrade. – Reading, UK : European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2018.
149. Hanssen R. F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. – Springer Science & Business Media, 2001. – T. 2.
150. Hu X., Wang T., Pierson T. C., Lu Z., Kim J., Cecere T. H. Detecting seasonal landslide movement within the Cascade landslide complex (Washington) using time-series SAR imagery //Remote Sensing of Environment. – 2016. – T. 187. – C. 49-61.
151. Hunsucker R. D., Hargreaves J. K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. – Cambridge University Press, 2007.
152. Hu Z., Mallorquí J. J. An accurate method to correct atmospheric phase delay for insar with the era5 global atmospheric model //Remote Sensing. – 2019. – T. 11. – №. 17. – C. 1969.
153. Hobiger T., Kinoshita Y., Shimizu S., Ichikawa R., Furuya M., Kondo T., Koyama Y. On the importance of accurately ray-traced troposphere corrections for Interferometric SAR data //Journal of Geodesy. – 2010. – T. 84. – C. 537-546.
154. Houlié N., Funning G. J., Bürgmann R. Use of a GPS-derived troposphere model to improve InSAR deformation estimates in the San Gabriel Valley, California //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2016. – T. 54. – №. 9. – C. 5365-5374.
155. Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches //Geophysical Research Letters. – 2008. – T. 35. – №. 16.
156. Hooper A. A statistical-cost approach to unwrapping the phase of InSAR time series //Proceedings of the International Workshop on ERS SAR Interferometry, Frascati, Italy. – 2010. – T. 30.
157. Hooper A., Pietrzak J., Simons W., Cui H., Riva R., Naeije M., Terwisscha van Scheltinga A., Schrama E., Stelling G., Socquet A. Importance of horizontal seafloor motion on tsunami height for the 2011 Mw= 9.0 Tohoku-Oki earthquake //Earth and Planetary Science Letters. – 2013. – T. 361. – C. 469-479.
158. İnce F. Nano and micro satellites as the pillar of the “new space” paradigm //Journal of Aeronautics and Space Technologies. – 2020. – T. 13. – №. 2. – C. 235-250.

159. Jacobsen K. Analysis of SRTM elevation models //EARSel 3D-Remote Sensing Workshop, Porto. – 2005.
160. Jolivet R., Grandin R., Lasserre C., Doin M. P., Peltzer G. Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data //Geophysical Research Letters. – 2011. – T. 38. – №. 17.
161. Jolivet R., Agram P. S., Lin N. Y., Simons M., Doin M. P., Peltzer G., Li Z. Improving InSAR geodesy using global atmospheric models //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2014. – T. 119. – №. 3. – C. 2324-2341.
162. Joughin I., Smith B. E., Howat I. M., Scambos T., Moon T. Greenland flow variability from ice-sheet-wide velocity mapping //Journal of Glaciology. – 2010. – T. 56. – №. 197. – C. 415-430.
163. Jiang M., Yong B., Tian X., Malhotra R., Hu R., Li Z., Yu Z., Zhang X. The potential of more accurate InSAR covariance matrix estimation for land cover mapping // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. T. 126. C. 120-128.
164. Kampes B.M. Radar interferometry: persistent scatterers technique //The Netherlands: Springer. – 2006.
165. Karimzadeh S. Matsuoka M., Miyajima M., Adriano B., Fallahi A., Karashi, J. Sequential SAR coherence method for the monitoring of buildings in Sarpole-Zahab, Iran //Remote Sensing. – 2018. – T. 10. – №. 8. – C. 1255.
166. Kiryukhin A. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) //Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2016. – T. 323. – C. 129-147.
167. Kim J. R., Lin S. Y., Yun H. W., Tsai Y. L., Seo H. J., Hong S., Choi Y. Investigation of potential volcanic risk from Mt. Baekdu by DInSAR time series analysis and atmospheric correction //Remote Sensing. – 2017. – T. 9. – №. 2. – C. 138.
168. Khalil R. Z., Haque S. InSAR coherence-based land cover classification of Okara, Pakistan // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2018. T. 21. C. S23-S28.
169. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Werner M., Younis M., Zink M TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2007. – T. 45. – №. 11. – C. 3317-3341.
170. Lanari R., Fornaro G., Riccio D., Migliaccio M., Papathanassiou K. P., Moreira J. R., Coltelli M. Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: The Etna case study //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996. – T. 34. – №. 5. – C. 1097-1114.
171. Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P., Sansosti E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms //IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2004. – T. 42. – №. 7. – C. 1377-1386.

172. Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., Pepe A. An overview of the small baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis //Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change. – 2007. – C. 637-661.
173. Lanari R., Casu F., Manzo M., Lundgren P. Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California //Remote Sensing of Environment. – 2007. – T. 109. – №. 1. – C. 20-28.
174. Lanari R., Berardino P., Bonano M., Casu F., Manconi A., Manunta M., Manzo M., Pepe A., Pepe S., Sansosti E., Solaro G., Tizzani P., Zeni G. Surface displacements associated with the L'Aquila 2009 Mw 6.3 earthquake (central Italy): New evidence from SBAS-DInSAR time series analysis //Geophysical Research Letters. – 2010. – T. 37. – №. 20.
175. Le Toan T., Laur H., Mougin E., Lopes A. Multitemporal and dual-polarization observations of agricultural vegetation covers by X-band SAR images //IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 1989. – T. 27. – №. 6. – C. 709-718.
176. Lee J. S., Papathanassiou K. P., Ainsworth T. L., Grunes M. R., Reigber, A. A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – T. 36. – №. 5. – C. 1456-1465.
177. Liang C., Agram P., Simons M., Fielding E. J. Ionospheric correction of InSAR time series analysis of C-band Sentinel-1 TOPS data //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2019. – T. 57. – №. 9. – C. 6755-6773.
178. Li Z., Muller J. P., Cross P., Albert P., Fischer J., Bennartz R. Assessment of the potential of MERIS near-infrared water vapour products to correct ASAR interferometric measurements //International Journal of Remote Sensing. – 2006. – T. 27. – №. 2. – C. 349-365.
179. Li, Z., Bethel J. Image coregistration in SAR interferometry //The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – T. 37. – C. 433-438.
180. Li Z., Muller J. P., Cross P., Fielding E. J. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2005. – T. 110. – №. B3.
181. Li Z., Fielding E. J., Cross P., Preusker R. Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models //International Journal of Remote Sensing. – 2009. – T. 30. – №. 13. – C. 3343-3363.
182. Li Z. W., Ding X. L., Huang C., Zhu J. J., Chen Y. L. Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2008. – T. 63. – №. 6. – C. 621-634.
183. Li Z., Cao Y., Wei J., Duan M., Wu L., Hou J., Zhu J. Time-series InSAR ground deformation monitoring: Atmospheric delay modeling and estimating //Earth-Science Reviews. – 2019. – T. 192. – C. 258-284.

184. Li Z. W., Ding X. L., Liu G. X. Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS observations: algorithms and some test results //Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2004. – T. 66. – №. 11. – C. 907-917.
185. Li Z., Fielding E. J., Cross P. Integration of InSAR time-series analysis and water-vapor correction for mapping postseismic motion after the 2003 Bam (Iran) earthquake //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – T. 47. – №. 9. – C. 3220-3230.
186. Li Z. W., Xu W. B., Feng G. C., Hu J., Wang C. C., Ding X. L., Zhu J. J. Correcting atmospheric effects on InSAR with MERIS water vapour data and elevation-dependent interpolation model //Geophysical journal international. – 2012. – T. 189. – №. 2. – C. 898-910.
187. Li Z., Muller J. P., Cross P., Fielding E. J. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2005. – T. 110. – №. B3.
188. Lin Y. N. N., Simons M., Hetland E. A., Muse P., DiCaprio C. A multiscale approach to estimating topographically correlated propagation delays in radar interferograms //Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2010. – T. 11. – №. 9.
189. Liang C., Agram P., Simons M., Fielding E. J. Ionospheric correction of InSAR time series analysis of C-band Sentinel-1 TOPS data //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2019. – T. 57. – №. 9. – C. 6755-6773.
190. Liang H., Zhang L., Ding X., Lu Z., Li X. (2018). Toward Mitigating Stratified Tropospheric Delays in Multitemporal InSAR: A Quadtree Aided Joint Model. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1–13.
191. Liu S., Hanssen R., Mika Á. On the value of high-resolution weather models for atmospheric mitigation in SAR interferometry //2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2009. – T. 2. – C. II-749-II-752.
192. Liu Z., Bian Z. F., Lei S. G., Liu D. L., Sowter A. Evaluation of PS-DInSAR technology for subsidence monitoring caused by repeated mining in mountainous area //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2014. – T. 24. – №. 10. – C. 3309-3315.
193. Letsios V., Faraslis I., Stathakis D. InSAR DSM using Sentinel 1 and spatial data creation //Proceedings of the 22th AGILE International Conference on Geographic Information Science (AGILE 2019), Limassol, Cyprus. – 2019. – C. 17-20.
194. Lundgren P., Lu Z. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations //Geophysical Research Letters. – 2006. – T. 33. – №. 6.
195. Lundgren P., Girona T., Bato M. G., Realmuto V. J., Samsonov S., Cardona C., Franco L., Gurrola E., Aivazis M. The dynamics of large silicic systems from satellite remote sensing observations: The intriguing case of Domuyo volcano, Argentina // Scientific reports. 2020. V. 10. No. 1. P. 1-15.
196. Löfgren J. S., Björndahl F., Moore A. W., Webb F. H., Fielding E. J., Fishbein E. F. Tropospheric correction for InSAR using interpolated ECMWF data and GPS zenith total

- delay from the Southern California integrated GPS network //2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2010. – C. 4503-4506.
197. Ma G., Zhao Q., Wang Q., Liu M. On the Effects of InSAR Temporal Decorrelation and Its Implications for Land Cover Classification: The Case of the Ocean-Reclaimed Lands of the Shanghai Megacity // *Sensors*. 2018. T. 18. №. 9. C. 2939.
198. Massonnet, D., Souyris, J.-C. Imaging with synthetic aperture radar. EFPL Press, 2008. 280 p. Manunta M., De Luca C., Zinno I., Casu F., Manzo M., Bonano M., Fusco A., Pepe A., Onorato G., Berardino P., De Martino P., Lanari R. The parallel SBAS approach for Sentinel-1 interferometric wide swath deformation time-series generation: Algorithm description and products quality assessment // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2019. – T. 57. – №. 9. – C. 6259-6281.
199. Moeremans B., Dautrebande S. The use of ERS SAR interferometric coherence and PRI images to evaluate crop height and soil moisture. – *Fringe*, 1999.
200. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K. P. A tutorial on synthetic aperture radar // *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*. – 2013. – T. 1. – №. 1. – C. 6-43.
201. Moreira A., Krieger G., Hajnsek I., Hounam D., Werner M., Riegger S., Settelmeier E. TanDEM-X: a TerraSAR-X add-on satellite for single-pass SAR interferometry // *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. – IEEE, 2004. – T. 2. – C. 1000-1003.
202. Morishita Y., Lazecky M., Wright T. J., Weiss J. R., Elliott J. R., Hooper A. LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor // *Remote Sensing*. – 2020. – T. 12. – №. 3. – C. 424.
203. McCurdy H. E. Faster, better, cheaper: Low-cost innovation in the US space program. – JHU Press, 2001.
204. Murray K. D., Bekaert D. P. S., Lohman R. B. Tropospheric corrections for InSAR: Statistical assessments and applications to the Central United States and Mexico // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – T. 232. – C. 111326.
205. Mesinger F., DiMego G., Kalnay E., Mitchell K., Shafran P. C., Ebisuzaki W., Jović D., Woollen J., Rogers E., Berbery E. H., Ek M. B., Fan Y., Grumbine R., Higgins W., Li H., Lin Y., Manikin G., Parrish D., Shi W. North American regional reanalysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2006. – T. 87. – №. 3. – C. 343-360.
206. Meyer F. J. Performance requirements for ionospheric correction of low-frequency SAR data // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. – 2011. – T. 49. – №. 10. – C. 3694-3702.
207. Meyer F. J., Chotoo K., Chotoo S. D., Huxtable B. D., Carrano C. S. The influence of equatorial scintillation on L-band SAR image quality and phase // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2015. – T. 54. – №. 2. – C. 869-880.

208. Milczarek W., Blachowski J., Grzempowski P. Application of PSInSAR for assessment of surface deformations in post-mining area—Case study of the former Walbrzych hard coal basin (SW Poland) //Acta Geodyn. Geomater. – 2017. – T. 14. – №. 1. – C. 185.
209. Miano A., Bonano M., Di Carlo F., Lanari R., Manunta M., Meda A., Mele A., Prota A., Saetta A., Stella A. Satellite radar interferometry: Potential and limitations for structural assessment and monitoring //Journal of Building Engineering. – 2022. – T. 46. – C. 103756.
210. Mora O., Mallorqui J. J., Broquetas A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – T. 41. – №. 10. – C. 2243-2253.
211. Ningthoujam R. K., Tansey K., Balzter H., Morrison K., Johnson S. C., Gerard F., George Ch., Burbidge G., Doody S., Veck N., Llewellyn G. M., Blythe T. Relationships of S-band radar backscatter and forest aboveground biomass in different forest types //Remote Sensing. – 2017. – T. 9. – №. 11. – C. 1116.
212. Notti D., Herrera G., Bianchini S., Meisina C., García-Davalillo J. C., Zucca F. A methodology for improving landslide PSI data analysis //International Journal of Remote Sensing. – 2014. – T. 35. – №. 6. – C. 2186-2214.
213. Osmanoglu B., Sunar F., Wdowinski S., Cabral-Cano E. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – T. 115. – C. 90-102.
214. Onn F., Zebker H. A. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2006. – T. 111. – №. B9.
215. Parker A. L., Biggs J., Walters R. J., Ebmeier S. K., Wright T. J., Teanby N. A., Lu Z. Systematic assessment of atmospheric uncertainties for InSAR data at volcanic arcs using large-scale atmospheric models: Application to the Cascade volcanoes, United States //Remote Sensing of Environment. – 2015. – T. 170. – C. 102-114.
216. Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 2. – C. 242. Pelich R. et al. Mapping floods in urban areas from dual-polarization InSAR coherence data //IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2021. – T. 19. – C. 1-5.
217. Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth //Geophys. J. Int. 1996. V.125. P. 1–14.
218. Pi X., Freeman A., Chapman B., Rosen P., Li, Z. Imaging ionospheric inhomogeneities using spaceborne synthetic aperture radar //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2011. – T. 116. – №. A4.
219. Pi X. Ionospheric effects on spaceborne synthetic aperture radar and a new capability of imaging the ionosphere from space //Space Weather. – 2015. – T. 13. – №. 11. – C. 737-741.

220. Pierdicca N., Pelliccia F., Chini M. Thematic mapping at regional scale using siasge radar data at X and L band and optical images //2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2011. – C. 1095-1098.
221. Prati C., Rocca F. Focusing SAR data with time-varying Doppler centroid //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1992. – T. 30. – №. 3. – C. 550-559.
222. E. J. Fast recession of a West Antarctic glacier //Science. – 1998. – T. 281. – №. 5376. – C. 549-551.
223. Raspini F., Caleca F., Del Soldato M., Festa D., Confuorto P., Bianchini S. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis //Earth-Science Reviews. – 2022. – C. 104239.
224. Reigber A., Hellwich O. RAT (Radar Tools): A free SAR image analysis software package //Proceedings of EUSAR. – sn, 2004. – T. 4. – C. 997-1000.
225. Rignot E. J. Fast recession of a West Antarctic glacier //Science. – 1998. – T. 281. – №. 5376. – C. 549-551.
226. Richards M. A. A Beginner's Guide to interferometric SAR concepts and signal processing [AESS tutorial IV] //IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2007. – T. 22. – №. 9. – C. 5-29.
227. Richards J. A. Remote sensing with imaging radar. – Berlin/Heidelberg, Germany : Springer, 2009. – T. 1. – C. 172-173.
228. Richards, M.A., Scheer, J.A., Holm, W.A. Principles of modern radar. Basic principles. Edison, New Jersey: SciTech Publishing, 2010. 924 p.
229. Rouyet L., Lauknes T. R., Høgda K. A. Satellittbasert radarinterferometri (InSAR) for naturfare, skred og infrastruktur. – 2015
230. Rodriguez E., Martin J. M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars //IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing). – IET Digital Library, 1992. – T. 139. – №. 2. – C. 147-159.
231. Sandwell D. T., Sichoix L Topographic phase recovery from stacked ERS interferometry and a low-resolution digital elevation model //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2000. – T. 105. – №. B12. – C. 28211-28222.
232. Sandwell D. T., Myer D., Mellors R., Shimada M., Brooks B., Foster J. Accuracy and resolution of ALOS interferometry: Vector deformation maps of the Father's Day intrusion at Kilauea // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 11. P. 3524-3534.
233. Samsonov S. Three-dimensional deformation time series of glacier motion from multiple-aperture DInSAR observation //Journal of Geodesy. – 2019. – T. 93. – №. 12. – C. 2651-2660.
234. Sampson C. C., Smith A. M., Bates P. D., Neal J. C., Alfieri L., Freer J. E. A high-resolution global flood hazard model //Water resources research. – 2015. – T. 51. – №. 9. – C. 7358-7381.

235. Sang Y. F. A review on the applications of wavelet transform in hydrology time series analysis //Atmospheric research. – 2013. – T. 122. – C. 8-15.
236. Schaefer L. N., Di Traglia F., Chaussard E., Lu Z., Nolesini T., Casagli N. Monitoring volcano slope instability with Synthetic Aperture Radar: A review and new data from Pacaya (Guatemala) and Stromboli (Italy) volcanoes //Earth-science reviews. – 2019. – T. 192. – C. 236-257.
237. Schwabisch M. A fast and efficient technique for SAR interferogram geocoding //IGARSS'98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings.(Cat. No. 98CH36174). – IEEE, 1998. – T. 2. – C. 1100-1102.
238. Shahzad N., Ding X., Wu S., Liang H. Ground deformation and its causes in abbottabad city, pakistan from sentinel-1a data and mt-insar //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 20. – C. 3442.
239. Sharov A.I. Online Atlas of Glacier Fluctuations in the Eurasian High Arctic. // URL: <http://dib.joanneum.at/maires/index.php?page=atlas>
240. Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F. R., Moro M., Saroli M. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations //Remote Sensing of Environment. – 2008. – T. 112. – №. 6. – C. 3160-3172.
241. Shemer L., Kit E. Simulation of an interferometric synthetic aperture radar imagery of an ocean system consisting of a current and a monochromatic wave. Journal of Geophysical Research. 1991;96(C12):22063–22073.
242. Stevenson J. A., Sun X., Mitchell N. C. Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm //Geomorphology. – 2010. – T. 114. – №. 3. – C. 238-252.
243. Sun Y. Iterative RELIEF for feature weighting: algorithms, theories, and applications //IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2007. – T. 29. – №. 6. – C. 1035-1051.
244. Solari L., Del Soldato M., Bianchini S., Ciampalini A., Ezquerro P., Montalti R., Raspini F., Moretti S. From ERS 1/2 to Sentinel-1: subsidence monitoring in Italy in the last two decades //Frontiers in Earth Science. – 2018. – T. 6. – C. 149.
245. Spies B. F., Lamb A., Balzter H. Multi-Frequency SAR Applications for Land Cover Classification Within Copernicus Downstream Services //Earth Observation for Land and Emergency Monitoring. – 2017. – C. 75-99.
246. Siddique M. A., Strozzi T., Hajnsek I., Frey O. A case study on the correction of atmospheric phases for SAR tomography in mountainous regions //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2018. – T. 57. – №. 1. – C. 416-431.
247. Shi J., Dozier J., Rott H. Snow mapping in alpine regions with synthetic aperture radar //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1994. – T. 32. – №. 1. – C. 152-158.

248. Sinha S., Jeganathan C., Sharma L. K., Nathawat M. S. A review of radar remote sensing for biomass estimation //International Journal of Environmental Science and Technology. – 2015. – T. 12. – C. 1779-1792.
249. Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R. Application potentials of synthetic aperture radar interferometry for land-cover mapping and crop-height estimation // Current Science (00113891). 2006. T. 91. №. 6. C. 783-788.
250. Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F. R., Moro M., Saroli M. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations //Remote Sensing of Environment. – 2008. – T. 112. – №. 6. – C. 3160-3172.
251. Schlögel R., Marchesini I., Alvioli M., Reichenbach P., Rossi M., Malet J. P. Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models //Geomorphology. – 2018. – T. 301. – C. 10-20.
252. Shen L., Hooper A., Elliott J. A spatially varying scaling method for InSAR tropospheric corrections using a high-resolution weather model //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2019. – T. 124. – №. 4. – C. 4051-4068.
253. Talledo D. A., Miano A., Bonano M., Di Carlo F., Lanari R., Manunta M., Meda A., Mele A., Prota A., Stella A. Satellite radar interferometry: Potential and limitations for structural assessment and monitoring //Journal of Building Engineering. – 2022. – T. 46. – C. 103756.
254. Tsokas A., Rysz M., Pardalos P. M., Dipple K. SAR data applications in earth observation: An overview //Expert Systems with Applications. – 2022. – C. 117342.
255. Touzi R., Lopes A., Bruniquel J., Vachon P. W. Coherence estimation for SAR imagery //IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 1999. – T. 37. – №. 1. – C. 135-149.
256. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Interferometry and synthesis in radio astronomy. – Springer Nature, 2017. – C. 872.
257. Uieda L., Wessel P. PyGMT: Accessing the generic mapping tools from Python //AGU Fall Meeting Abstracts. – 2019. – T. 2019. – C. NS21B-0813.).
258. Vassileva M., Vassileva M., Giulio Tonolo F., Riccardi P., Lecci D., Boccardo P., Chiesa G. Satellite SAR interferometric techniques in support to emergency mapping //European journal of remote sensing. – 2017. – T. 50. – №. 1. – C. 464-477.
259. Vicente-Guijalba F., Jacob A., Lopez-Sanchez J.M., Lopez-Martinez C., Duro J., Notarnicola C., Ziolkowski D., Mestre-Quereda A., Pottier E., Mallorquí J.J., Lavalle M., Engdahl M. Sincohmap: Land-cover and vegetation mapping using multi-temporal sentinel-1 interferometric coherence // IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2018. C. 6631-6634.
260. Velez M. L., Euillades P., Caselli A., Blanco M., Díaz J. M. Deformation of Copahue volcano: Inversion of InSAR data using a genetic algorithm //Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2011. – T. 202. – №. 1-2. – C. 117-126.

261. Wadge G., Webley P. W., James I. N., Bingley R., Dodson A., Waugh S., Veneboer T., Puglisi G., Mattia M., Wadge G., Webley P. W., James I. N., Bingley R., Dodson A., Waugh S., Veneboer T., Puglisi G., Mattia M., Baker D., Edwards S. C., Edwards S. J., Clarke P. J. Atmospheric models, GPS and InSAR measurements of the tropospheric water vapour field over Mount Etna // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – T. 29. – №. 19. – C. 11-1-11-4.
262. Wangensteen B., Weydahl D. J., Hagen J. O. Mapping glacier velocities on Svalbard using ERS tandem DInSAR data // *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*. – 2005. – T. 59. – №. 4. – C. 276-285.
263. Wagner W., Vietmeier J., Schmullius C., Davidson M., Le Toan T., Quegan S., Gaveau D. The use of coherence information from ERS tandem pairs for determining forest stock volume in SIBERIA // *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120)*. – IEEE, 2000. – T. 4. – C. 1396-1398.
264. Wang L., Marzahn P., Bernier M., Ludwig R. Mapping permafrost landscape features using object-based image classification of multi-temporal SAR images // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. T. 141. C. 10-29.
265. Wang L., Scott K. A., Xu L., Claudi D. A. Sea ice concentration estimation during melt from dual-pol SAR scenes using deep convolutional neural networks: A case study // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2016. – T. 54. – №. 8. – C. 4524-4533.
266. Wang T., Jónsson S., Hanssen R. F. Improved SAR image coregistration using pixel-offset series // *Ieee geoscience and remote sensing letters*. – 2014. – T. 11. – №. 9. – C. 1465-1469.
267. Woodhouse I. H. Introduction to microwave remote sensing. – CRC press, 2005. – C. 400.
268. Wicks Jr C. W., Dzurisin D., Ingebritsen S., Thatcher W., Lu Z., & Iverson, J. Magmatic activity beneath the quiescent Three Sisters volcanic center, central Oregon Cascade Range, USA // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – T. 29. – №. 7. – C. 26-1-26-4.
269. Williams S., Bock Y., Fang P. Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1998. – T. 103. – №. B11. – C. 27051-27067.
270. Wright T. J., Parsons B., England P. C., Fielding E. J. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet // *Science*. – 2004. – T. 305. – №. 5681. – C. 236-239.
271. Webley P. W., Bingley R. M., Dodson A. H., Wadge G., Waugh S. J., James I. N. Atmospheric water vapour correction to InSAR surface motion measurements on mountains: results from a dense GPS network on Mount Etna // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2002. – T. 27. – №. 4-5. – C. 363-370. Xu Z. W., Wu J., Wu Z. S. A survey of ionospheric effects on space-based radar // *Waves in Random media*. – 2004. – T. 14. – №. 2. – C. S189.
272. Xiao F., Guarnieri A. M., Ding Z., Manzoni M. Improving the Split-Spectrum Method for Sentinel-1 Differential TOPSAR Interferometry // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2022. – T. 19. – C. 1-5.

273. Xiao R., Yu C., Li Z., Jiang M., He X. InSAR stacking with atmospheric correction for rapid geohazard detection: Applications to ground subsidence and landslides in China //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – Т. 115. – С. 103082.
274. Yang L., Meng X., Zhang X. SRTM DEM and its application advances //International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Т. 32. – №. 14. – С. 3875-3896.
275. Yu J. H., Ge L., Rizos C. Digital elevation model generation using multibaseline advanced land observing satellite/phased array type L-band synthetic aperture radar imagery //Journal of Applied Remote Sensing. – 2011. – Т. 5. – №. 1. – С. 053510-053510-13.
276. Yun H.W., Kim J.R., Choi Y.S., Lin S.Y. Analyses of Time Series InSAR Signatures for Land Cover Classification: Case Studies over Dense Forestry Areas with L-Band SAR Images //Sensors. 2019. Т. 19. №. 12. С. 2830.
277. Yu H., Xing M., Bao Z. A fast phase unwrapping method for large-scale interferograms //IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2013. – Т. 51. – №. 7. – С. 4240-4248.
278. Yunjun Z., Fattahi H., Amelung F. Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction //Computers & Geosciences. – 2019. – Т. 133. – С. 104331.
279. Zebker H. A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes //IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 1992. – Т. 30. – №. 5. – С. 950-959.
280. Zolesi B., Cander L. R. Ionospheric prediction and forecasting. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014.
281. Zhang Z., Lou Y., Zhang W., Wang H., Zhou Y., Bai J. On the assessment GPS-based WRFDA for InSAR atmospheric correction: a case study in Pearl River Delta Region of China //Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – №. 16. – С. 3280.
282. Zhu X. X., Bamler R., Lachaise M., Adam F., Shi Y., Eineder M. Improving TanDEM-X DEMs by non-local InSAR filtering //EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – VDE, 2014. – С. 1-4.
283. Zhao C., Kang Y., Zhang Q., Lu Z., Li B. Landslide identification and monitoring along the Jinsha River catchment (Wudongde reservoir area), China, using the InSAR method //Remote Sensing. – 2018. – Т. 10. – №. 7. – С. 993.
284. Единая электронная картографическая основа. – Изображение: электронное // РОСРЕЕСТР Федеральный портал пространственных данных: [Электронный ресурс]. – URL: <https://cgkipd.ru/CECD/> (дата обращения: 25.03.2021).
285. ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 01.11.2021).
286. Остров Визе. О полярных и арктических станциях. ФГБУ «Северное УГМС» [Электронный ресурс]. – URL: <http://sevmeteo.polarpost.ru/articles/18/76.shtml.html> (дата обращения – 24.10.2021).
287. Кроноцкий заповедник [Электронный ресурс]. – URL: <https://kronoki.ru/ru/kamchatka/kronotskiy-zapovednik/> (дата обращения 24.04.2023).

288. Погода и климат [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 24.04.2023).
289. Python package for GMTSAR processing [Электронный ресурс] // : Python GMTSAR, 2023 – URL: <https://pypi.org/project/pygmtsar/> (дата обращения: 01.05.2023).
290. Stanford Method for Persistent Scatterers [Электронный ресурс] // : STAMPS, 2018 – URL: <https://homepages.see.leeds.ac.uk> (дата обращения: 01.05.2023).
291. Sahraoui O. H., Hassaine B., Serief C., Hasni K. Radar interferometry with Sarscape software //Photogrammetry and Remote Sensing. – 2006.
292. ENVI SARscape [Электронный ресурс] // : SARscape, 2023 – URL: <https://www.sarmap.ch> (дата обращения: 01.05.2023).
293. GAMMA Software [Электронный ресурс] // : GAMMA, 2023 – URL: <https://www.gamma-rs.ch> (дата обращения: 01.05.2023).
294. The Sentinel Application Platform [Электронный ресурс] // : ESA, 2023 – URL: <https://step.esa.int> (дата обращения: 01.05.2023).
295. Wegnüller U., Werner C., Strozzi T., Wiesmann A., Frey O., Santoro M. Sentinel-1 support in the GAMMA software //Procedia Computer Science. – 2016. – Т. 100. – С. 1305-1312.
296. Hexagon Erdas Imagine [Электронный ресурс] // : Hexagon, 2023 – URL: <https://hexagon.com/products/erdas-imagine> (дата обращения: 01.05.2023).
297. Компания Ракурс ПО PHOTOMOD Radar [Электронный ресурс] // : Ракурс, 2023 – URL: <https://racurs.ru/program-products/photomod-radar> (дата обращения: 01.05.2023).
298. SNAPHU: Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping [Электронный ресурс] //: Stanford SNAPHU, 2023 – URL: <http://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/SNAPHU> (дата обращения: 01.05.2023).
299. Step forum for SNAP software [Электронный ресурс] // : Step forum, 2023 – URL: <https://forum.step.esa.int> (дата обращения: 01.05.2023).
300. Generic Mapping Tools for InSAR processing system [Электронный ресурс] // GMTSAR, 2016 – URL: <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/> (дата обращения: 21.05.2022).
301. Python libraries wrapper for the Generic Mapping Tools [Электронный ресурс] // PyGMT, 2022 – URL: <https://www.pygmt.org> (дата обращения: 21.05.2022).
302. Delft Object-oriented Radar Interferometric Software User’s manual and technical documentation [Электронный ресурс] // DEOS, 2009 – URL: <http://doris.tudelft.nl> (дата обращения: 21.05.2022).
303. Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) [Электронный ресурс] // CGIAR, 2023 – URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/> (дата обращения: 01.05.2023).
304. Earth Observation Center (EOC) of the German Aerospace Center (DLR) [Электронный ресурс] // EOC DLR, 2023 – URL: <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/> (дата обращения: 01.05.2023).

305. Sentinel-1 user-guide [Электронный ресурс] // ESA, 2023 – URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides> (дата обращения: 01.05.2023).
306. TanDEM-X - Digital Elevation Model [Электронный ресурс] // DLR, 2023 – URL: <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90> (дата обращения: 01.05.2023).
307. The Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise [Электронный ресурс] // : TRAIN , 2023 – URL: <https://github.com/dbekaert/TRAIN> (дата обращения: 01.05.2023).

Приложение 1. Мировая радиолокационная группировка на 07.02.2024

Миссия и КА	Страна	Дата запуска	Поляризация	Масса спутника, кг	Пространственное разрешение, м	Период замыкания орбиты*, сутки
X-диапазон						
ICEYE	Финляндия					
ICEYE X		12.01.2018	VV	85	0.25-3.0	18
ICEYE X2		03.12.2018				
ICEYE X4		05.07.2019				
ICEYE X5		05.07.2019				
ICEYE X6		28.09.2020				
ICEYE X7		28.09.2020				
ICEYE X8		24.01.2021				
ICEYE X9		24.01.2021				
ICEYE X10		24.01.2021				
ICEYE X11		30.06.2021				
ICEYE X12		30.06.2021				
ICEYE X13		30.06.2021				
ICEYE X14		13.01.2022				
ICEYE X15		30.06.2021				
ICEYE X16		13.01.2022				
ICEYE X17		25.05.2022				
ICEYE X18		25.05.2022				
ICEYE X19		25.05.2022				
ICEYE X20		25.05.2022				
ICEYE X21		03.01.2023				
ICEYE X22		03.01.2023				

ICEYE X24		25.05.2022				
ICEYE X27		03.01.2023				
ICEYE X23		12.06.2023				
ICEYE X25		12.06.2023				
ICEYE X26		12.06.2023				
ICEYE X30		12.06.2023				
ICEYE X31		11.11.2023				
ICEYE X32		11.11.2023				
ICEYE X34		11.11.2023				
ICEYE X35		11.11.2023				
Capella						
Capella 1 (Denali)		03.012.2018				
Capella 2 (Sequoia)		31.08.2020				
Capella 3 (Whitney1)		24.01.2021				
Capella 4 (C Whitney2)		24.01.2021				
Capella 5 (Whitney3)		30.06.2021				
Capella 6 (Whitney4)	CIIIA	15.05.2021	HH, VV	112	0.3, 0.5, 0.75	5
Capella 7 (Whitney5)		13.01.2022				
Capella 8 (Whitney6)		13.01.2022				
Capella 9 (Whitney7)		16.03.2023				
Capella 10 (Whitney8)		16.03.2023				
Capella 11 (Whitney9)		23.08.2023				
<u>Umbra-SA</u>						
Umbra-01		30.06.2021	HH, VV	70	0.25-2.0	14
Umbra-02		13.01.2022				

Umbra-03		25.05.2022				
Umbra-04		03.01.2023				
Umbra-05		03.01.2023				
Umbra-06		15.04.2023				
Umbra-07		11.11.2023				
Umbra-08		11.11.2023				
Harbinger (ICEYE X3)		05.05.2019	VV	150	1.0	18
COSMO-SkyMed						
COSMO 1	Италия	08.06.2007	HH, HV, VH, VV	1900	1.0-100.0	16
COSMO 2		09.12.2007				
COSMO 3		25.10.2008				
COSMO 4		06.11.2010				
COSMO-SkyMed (second generation)						
CSG1		18.12.2019		2205	0.3, 0.6, 0.8, 3.0, 4.0, 6.0	16
CSG2		31.01.2022				
QPS-SAR						
QPS-SAR1	Япония	11.12.2019		100	0.5, 0.7	
QPS-SAR2		24.01.2021		100		
QPS-SAR3		12.10.2022		170		
QPS-SAR4		12.10.2022		170		
QPS-SAR5		15.12.2023				
QPS-SAR6		12.06.2023				
StriX						
StriX α		15.12.2020	VV	150	1.0 – 3.0	
StriX β		28.02.2022				

StriX 1		15.09.2022		100		
ANSARO-2		17.01.2018	HH, VV	570	1.0 – 16.0	14
TH (Tianhui 2)						
TH 2-01A		29.04.2019	HH			
TH 2-01B		18.08.2021				
TH 2-02A						
TH 2-02B						
Taijing-4 01		27.02.2022		350	до 1.0	
Sixiang						
Sixiang 01		27.07.2023				
Hongtu-1						
Чжунъюань-1				320	0.5-5.0	15
Хэби-1		30.03.2023		270		
Хэби-2						
Хэби-3						
SAR-Lupe	Германия					
SAR-Lupe 1		19.12.2006	HH, VV	770	менее 1.0	16
SAR-Lupe 2		02.07.2007				
SAR-Lupe 3		01.11.2007				
SAR-Lupe 4		27.03.2008				
SAR-Lupe 5		22.07.2008				
SARah						
SARah1		18.06.2022		2200	менее 1.0	
TSX						
TerraSAR-X		15.06.2007	HH, HV, VH,	1230	1.0 - 16.0	11

TanDEM-X		21.06.2010	VV	1340			
PAZ	Испания	22.02.2018	HH, HV, VH, VV	1350	0.25 - 18.5	11	
KOMPSAT-5	Южная Корея	22.08.2013	HH, HV, VH, VV	1400	1.0 - 20.0	28	
Doory-Sat		04.12.2023					
<u>Ofeq</u>	Израиль						
Ofeq 8 (TecSAR1)		21.01.2008	HH, HV, VH, VV	260	1.0 - 20.0	36	
Ofeq 10 (TecSAR2)		09.04.2014		400			
Ofeq 13 (TecSAR3)		28.03.2023					
<u>RISAT</u>	Индия						
RISAT 2		20.04.2009	HH, HV, VH, VV	300	1.0 – 8.0	14	
RISAT 2B		22.05.2019		615	0.5		
RISAT 2BR1		11.12.2019		628	0.35		
RISAT 2BR2		07.11.2020		630			
<u>С-диапазон</u>							
<u>Sentinel-1</u>	Европа						
Sentinel-1A		03.04.2014	HH, HV, VH, VV	2280	4 – 25	12	
Sentinel-1B		25.04.2016					
<u>Tianxian-SAR</u>	Китай						
Haisea-1		22.12.2020	VV	185	1-20	15	
Chaohu-1		07.02.2022		285	0.5-20	12	
<u>Gaofen</u>							
GF 3-01		10.08.2016	HH, VH,VV	HV,	2950	1-500	29
GF 3-02		22.11.2021					

GF 3-03		06.04.2022				
GF 12-04		20.08.2023				
RadarSat	Канада					
RadarSat-2		14.12.2007	HH, HV, VH, VV	2300	3-100	24
<u>RadarSat –Constellation</u>						
RCM-1		12.06.2019	HH, HV, VH, VV	1430	3-100	12
RCM-2						
RCM-3						
<u>RISAT</u>	Индия					
RISAT 1A		14.02.2022	HH, HV, VH, VV	1858	1 – 50	
S-диапазон						
<u>HJ «Huan Jing»</u>	Китай					
HJ 1C		18.11.2012		890	3-100	
HJ 2E		13.10.2022				
Huanjing-2F		26.05.2023				
S-SAR01		12.10.2022			5-100	
NovaSAR-1	Великобритания	16.09.2018	HH, HV, VV	490	6 – 30	
CIRIS	США	05.12.2019				
NorSat-3	Норвегия	29.04.2021		15		
Кондор-ФКА	Россия					
Кондор-ФКА №1		27.05.2023	HH, VV	1000	1-12	16
L -диапазон						
SMAP (Soil Moisture Active-Passive)	США	31.01.2015	HH, VV HV	944	8	
ALOS 2	Япония	24.05.2014	HH, HV, VH,	2120	1 – 10	14

			VV			
Yaogan (Jian Bing-JB)	Китай					
Yaogan 1 (JB-5-1)		26.04.2006				
Yaogan 3 (JB-5-2)		11.11.2007				
Yaogan 10 (JB-5-3)		09.08.2010				
Yaogan 6 (JB-7-1)		22.04.2009				
Yaogan 13 (JB-7-2)		29.11.2011		2700	7-100	
Yaogan 18 (JB-7-3)		29.10.2013				
Yaogan 23 (JB-7-4)		14.11.2014				
Yaogan 29 (JB X 1)		26.11.2015				
Yaogan 33-01R (JB X 3)		28.12.2020				
Yaogan 33-02 (JB X 4)		09.02.2022				
LuTan						
LT 1-01A (L-SAR 01A)	26.01.2022	HH, HV, VH,	3200	8	3	
LT 1-01B (L-SAR 01B)	26.02.2022	VV				
LT 4-01 (L-SAR 04A)	12.08.2023					
SAOCOM						
SAOCOM 1A	Аргентина	07.10.2018	HH, HV, VH и	3000	16	7 - 100
SAOCOM 1B		30.08.2020	VV			

* Для одного КА

Приложение 2. Режимы обзора при съемке РСА

Все режимы отличаются технологией получения изображений, их пространственным охватом и разрешением (рис.), так же не всегда во всех режимах обзора реализована интерферометрическая съемка.

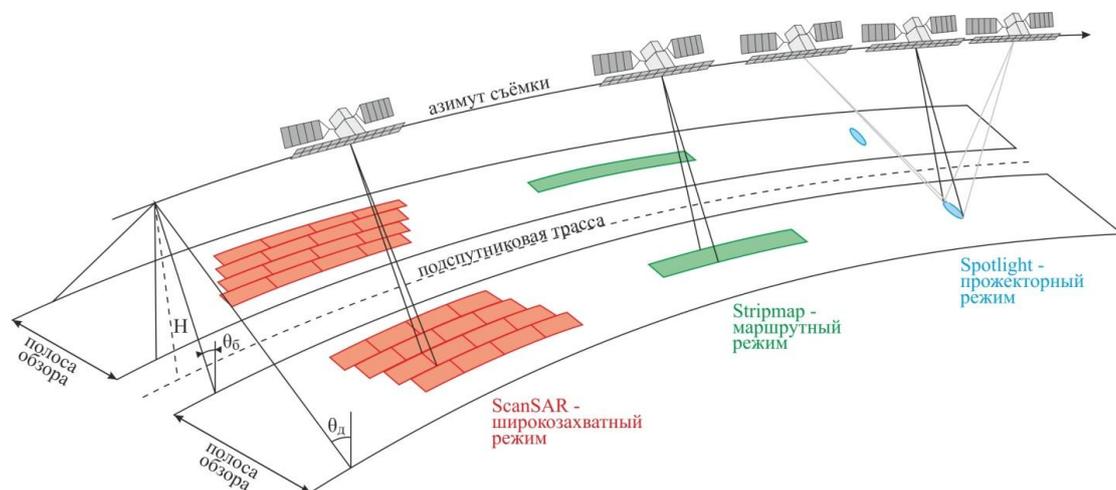


Рисунок. Режимы обзора (Трошко, 2018)

Широкозахватный режим имеет самую широкую полосу захвата (обзора) среди остальных режимов и может достигать нескольких сотен километров, при этом пространственное разрешение низкое – от десятков до сотен метров. Изображения получаются путём последовательного переключения импульса в направлении съёмки. При маршрутном режиме съёмка осуществляется в пределах одной полосы, ширина которой достигает десятков километров. Пространственное разрешение в этом случае достигает нескольких метров. При прожекторном режиме обзора в процессе движения спутника луч антенны многократно направляют в центр снимаемого участка. При этом режиме получают минимальный пространственный охват, но наивысшее пространственное разрешение – до десятков сантиметров (Верба и др., 2010).

Таблица. Режимы обзора при съемке РСА

Режим обзора (англ.)	Режим обзора (общепринятый перевод)	Режим обзора (отечественные КА)
ScanSAR	Широкозахватный	обзорный (ОР)
StripMap	Маршрутный	детальный непрерывный (ДНР)
SpotLight	Прожекторный	детальный прожекторный (ДПР)

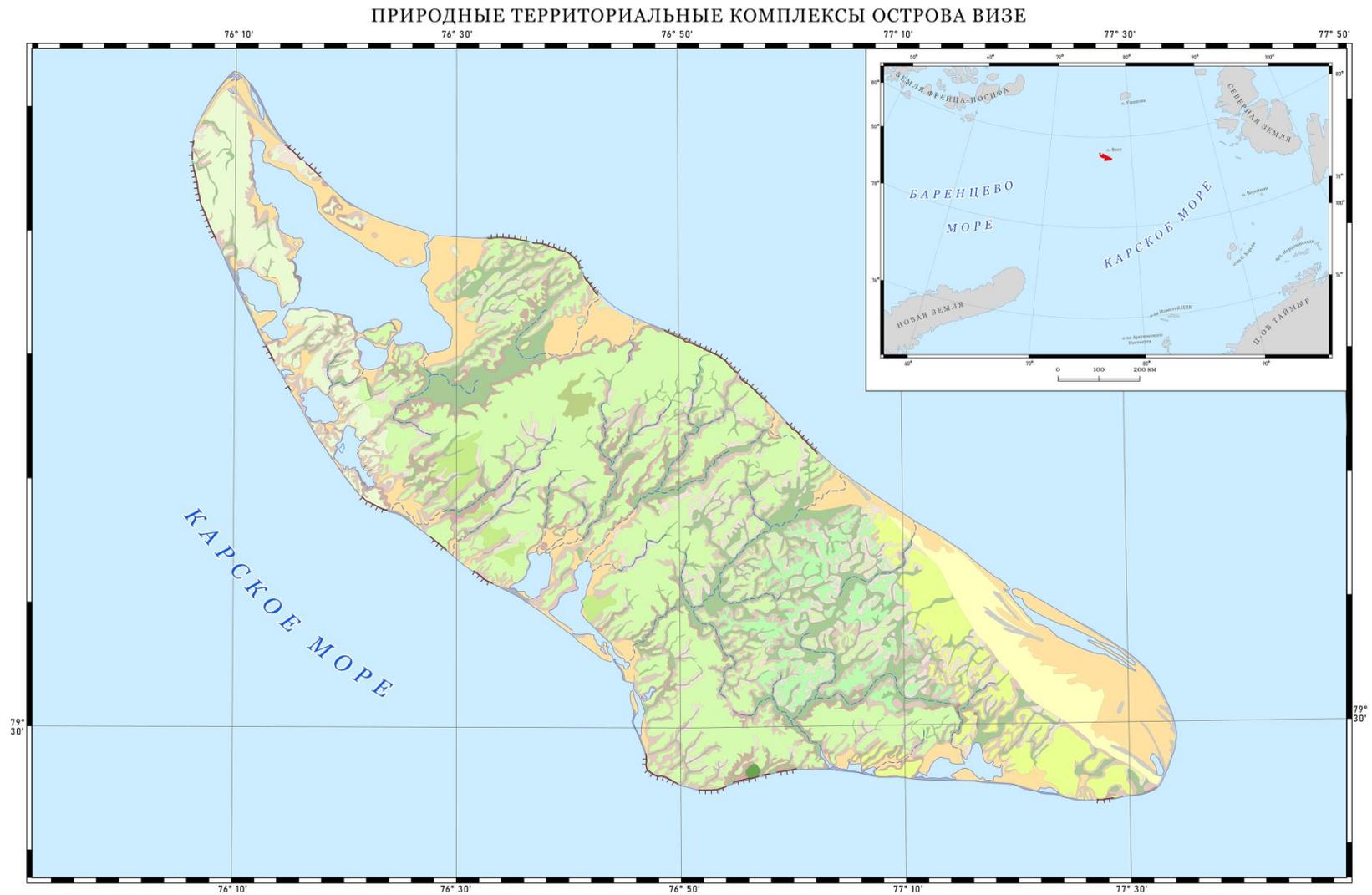
Приложение 3. Принципы интерпретации цветов на композите МТС

Относительная выраженность каналов RGB-композита	Итоговый цвет на композите МТС	Тип объекта
Сильная амплитуда обоих снимков, высокая когерентность	Белый с оттенками синего	Неровные поверхности (высокая амплитуда) с высокой когерентностью (из-за отсутствия густой растительности на этих поверхностях)
Сильная амплитуда обоих снимков, низкая когерентность	Желтый	Естественная природная растительность
Слабая амплитуда обоих снимков, высокая когерентность	Темно-синий	Плоские поверхности (низкая амплитуда) с высокой когерентностью (из-за отсутствия растительности на этих поверхностях) Открытая плоская поверхность и (или) влажный грунт без изменений за период между радарными съемками. Чем темнее оттенок синего — тем более плоская (либо влажная) поверхность на обоих снимках
Амплитуда второго снимка больше, чем амплитуда первого, при очень низкой когерентности	Ярко-зеленый (сильные амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда второго снимка выше)	
	Темно-зеленый (слабые амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда второго снимка выше)	
Амплитуда первого снимка больше, чем амплитуда второго, при очень низкой когерентности	Ярко-красный (сильные амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда первого снимка выше)	
	Темно-красный (слабые амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда первого снимка выше)	
Все три канала равномерно средне выражены	Темные оттенки красного, зеленого и синего	Шероховатая поверхность без растительности, влагосодержание которого незначительно

		изменилось за период между съемками
Очень низкая амплитуда обоих снимков и очень низкая когерентность	Черный или темно- серый цвет	Водная поверхность

*Составлено по материалам статьи: *Пиетранера Л., Чезарано Л., Бритти Ф., Джентиле В., Кантемиров Ю.И. Новый продукт МТС, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed // Геоматика. 2012. №. 1. С. 46-51.*

Приложение 4. Карта. Природно-территориальные комплексы острова Визе



Карта составлена по результатам дешифрирования материалов оптической и радиолокационной съемки

Формы рельефа	ПТК		Цвет* участков на многовременных композитах с когерентностью за 12-дневный период		
ПОЛОГОУВАЛИСТЫЕ ПЛАСТОВЫЕ ЭРОЗИОННО-ДЕНУДАЦИОННЫЕ РАВИНЫ С РАННЕМЕЛОВЫМ ЦОКОЛЕМ И МАЛОМОЩНЫМ ЧЕХЛОМ РЫЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (ПЕСКОВ, ПЕСЧАННИКОВ И АЛЕВРИТОВ)	Равнины с выраженным криогенным полигональным микрорельефом и пятнистой с общим проективным покрытием до 5-7%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь	высотой 12-20 м	Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года		
		высотой 6-12 м			
	Равнины высотой 12-20 м со слабовыраженным криогенным полигональным микрорельефом и пятнистой с общим проективным покрытием до 10-12%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь			Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года Желтый - сильное влияние растительности в период активной вегетации	
	Равнины высотой 12-22 м с сильновыраженным криогенным полигональным микрорельефом и пятнистой с общим проективным покрытием до 3%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь			Желтый - сильная расчлененность рельефа	
	Участок равнины высотой 12-14 м антропогенно преобразованный с общим проективным покрытием до 20%, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительностью арктических пустынь			Желтый - сильное влияние растительности в период активной вегетации	
	Заболоченные котловины в пределах равнины с криогенным полигональным микрорельефом и мохово-лишайниковой растительностью арктических пустынь			Синий - плоские участки Черный - переувлажнение	
	Участки равнины с обнажением раннемелового цоколя высотой 12-20 м с невыраженным проявлением криогенных процессов без растительности			Синий, голубой - плоские или слегка неровные участки, изменениям за теплый период не подвергаются	
СКЛОНЫ ДЕЛЮВИАЛЬНЫЕ, СОЛИФЛЮКЦИОННЫЕ И ТЕРМОЭРОЗИОННЫЕ	Склоны делювиальные, солифлюкционные термоэрозионные с очень густым расчленением промоинами без растительности	крутые и очень крутые (15° и более)	Желтый - сильная расчлененность рельефа Черный - переувлажнение	   	
		средней крутизны (8-15°)			
		пологие (4-8°)			
		очень пологие (2-4°)			
		обрывы			
ДНИЩА ОВРАГОВ И ЛОЖБИН СТОКА ТАЛЫХ ВОД	Песчаные днища оврагов и ложбин стока талых вод с отдельными сообществами мохово-лишайниковой растительности		Синий - плоские участки Черный - переувлажнение Красный/зеленый - изменение степени увлажнения		
СОВРЕМЕННАЯ МОРСКАЯ ТЕРРАСА	Участки современной морской террасы с золовым микрорельефом, не подверженные затоплению приливами и нагонами без растительности		Синий - плоские участки Черный зашумленный - переувлажнение Красный/зеленый - изменение степени увлажнения		
НИЗМЕННЫЕ РАВИНЫ И АККУМУЛЯТИВНЫЕ БЕРЕГА	Приливные песчаные осушки и прибрежные и прилагунные песчаные низменные равнины, затапливаемые высокими приливами и нагонами (лайды) без растительности		Черный зашумленный - плоские переувлажненные участки Красный/зеленый - изменение степени увлажнения		
	Галечные и валунно-галечные пляжи		Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года		
	Валунно-галечные гряды		Белый - неровные участки с шероховатым отражением сигнала, не подвергаются изменениям в теплое время года		

*Пояснения к основным цветам на мультивременных композитах с когерентностью:

Белый - высокие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, высокая когерентность

Синий - низкие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, высокая когерентность

Желтый - высокие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, низкая когерентность

Черный - низкие значения амплитуды (яркости) на первом и втором снимках, низкая когерентность

Красный - высокие значения амплитуды (яркости) на первом снимке и низкие на втором, низкая когерентность

Зеленый - низкие значения амплитуды (яркости) на первом снимке и высокие на втором, низкая когерентность

Приложение 5. Статистика значений по МТС природно-территориальных комплексов острова Визе

Таблица. Кодировка природно-территориальные комплексы острова Визе

Код	Характеристика межсезонных МТС	Форма рельефа	Генезис	Растительность	Характеристика рельефа*	
100	Близкие низкие значения когерентности – обусловленные растительностью. Для значений амплитуд характерен одинаковый разброс, но разные средние значения в зависимости от высоты равнины и расчлененности рельефа.	Пологоувалистые пластовые эрозионно-денудационные равнины с раннемеловым цоколем и маломощным чехлом рыхлых отложений (песков, песчанников и алевроитов)	Равнины с выраженным криогенным полигональным микрорельефом	пятнистой с общим проективным покрытием до 10%, приуроченной преимущественно к трещинам усыхания, мохово-лишайниковой с участием подушечных форм разнотравья растительность арктических пустынь	Равнины высотой 12-22 м	
101					Равнины высотой 6-12 м	
102			Стабильные значения когерентности – обусловленные незначительной растительностью. Значения амплитуды между собой также стабильны: близкие средние значения и разброс, что связано с преимущественно криогенным рельефом.		Равнины сильноденудированные с сильновыраженным криогенным полигональным микрорельефом	Равнины высотой 12-22 м
103			Показатели близки к 102, но в отличие от них еще меньший разброс значений когерентности в связи с еще большим отсутствием растительности, меньше среднее значение амплитуд из-за слабовыраженного криогенного рельефа.		Равнины со слабовыраженным криогенным полигональным микрорельефом	Равнины высотой 12-22 м
150	Высокая когерентность, тем не менее, есть небольшой разброс подтверждающий наличие незначительной растительности.		Антропогенно-преобразованный	с общим проективным покрытием до 20% мохово-лишайниковой с участием подушечных	Участок равнины высотой 12-14 м	

	Значение амплитуд высокие – металлические сооружения.			форм разнотравья растительностью арктических пустынь	
199	Малые значения когерентности при сильном разбросе значений – обусловлено заболоченностью и в меньшей мере растительностью. Небольшой разброс значений амплитуд также из-за заболоченности территории.		Заболоченные котловины в пределах равнины с криогенным полигональным микрорельефом	мохово-лишайниковой растительностью арктических пустынь	
400	Распределения значений когерентности практически не различаются, как и амплитуд, однако значения амплитуд несколько выше у группы №2.		Участок равнины с обнажением раннемелового цоколя с невыраженным криогенным воздействием	без растительности	Равнина высотой 12-20 м
201		Склоны делювиальные, солифлюкционные и термоэрозионные группа №1	Склоны делювиальные, солифлюкционные и термоэрозионные с очень густым расчленением проминами	без растительности	Очень пологие
202					пологие
203					средней крутизны
204					крутые и очень крутые
401					Очень пологие
402					пологие
403					средней крутизны
404					крутые и очень крутые
300	По своим амплитудным характеристикам похожи на 602, но с более стабильной когерентностью.	Днища оврагов и ложбин стока талых вод	Песчаные днища оврагов и ложбин стока талых вод с отдельными		

			сообществами мохово-лишайниковой растительности		
500	Стабильный разброс значений когерентности, амплитуды выше, чем у 600, хотя средние близкие	Современная морская аккумулятивная терраса	Участки современной морской террасы с эоловым микрорельефом, не подверженные затоплению приливами и нагонами		
600	600 и 601 вместе с 500 отличаются меньшие значения когерентности и амплитуды		Приливные песчаные ошшки и прибрежные и прилагунные песчаные низменные равнины, затапливаемые в периоды снеготаяния, высокими приливами и нагонами (лайды)		
601	слабая когерентность				
602	очень близки (май) амплитуды		Каменистые пляжи		
603	практически одинаковые, но когерентность 603 значительно выше		Каменные гряды		

* Информация взята по ArcticDEM.

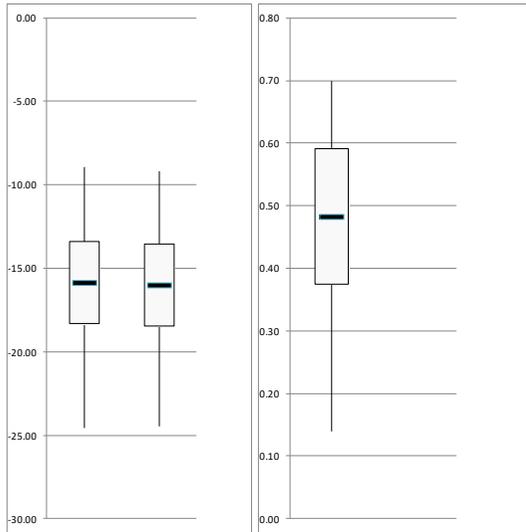
** Пространственное разрешение данных Sentinel-1 не позволяет определить характеристики.

*** Распределение в одной лишь части о. Визе.

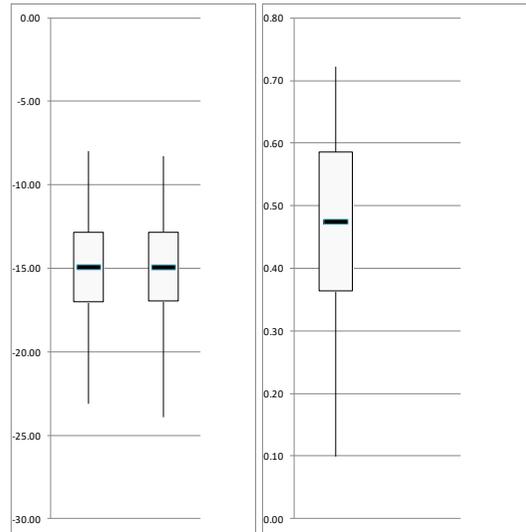
24.11.2019-06.12.2019

Приложение 5.1

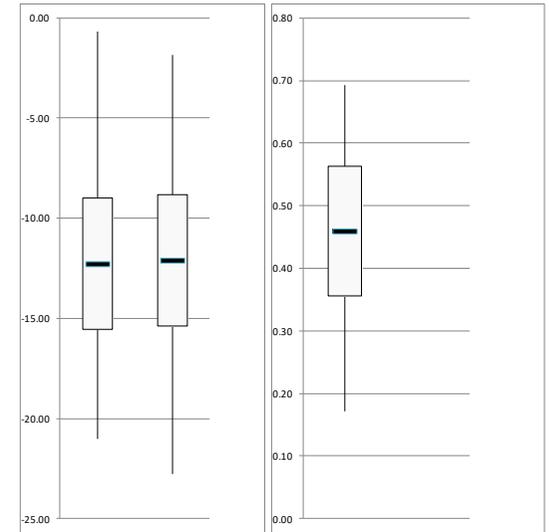
100



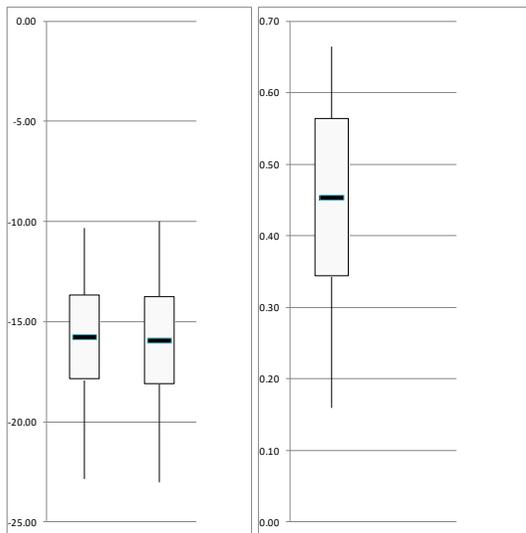
102



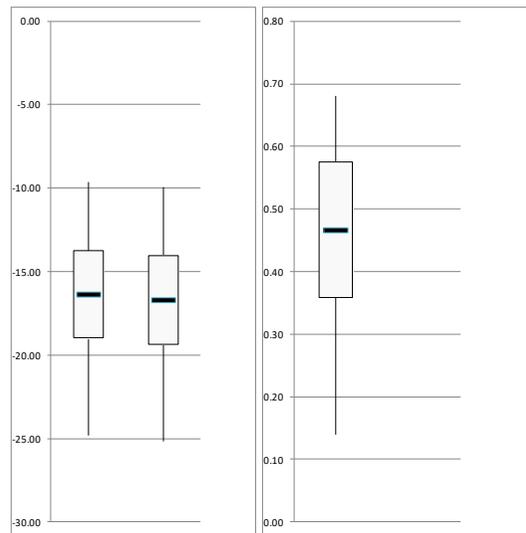
150



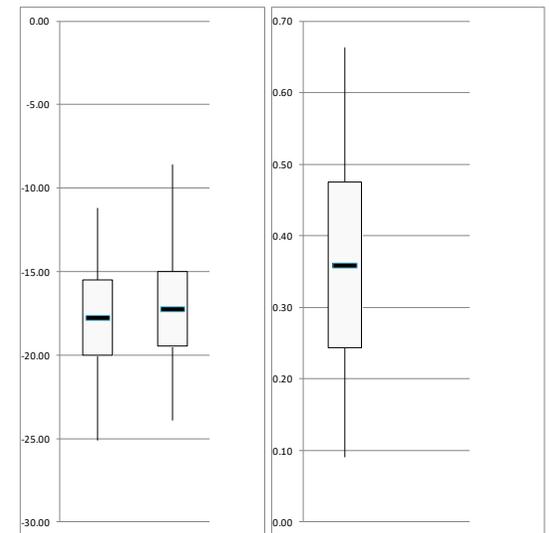
101



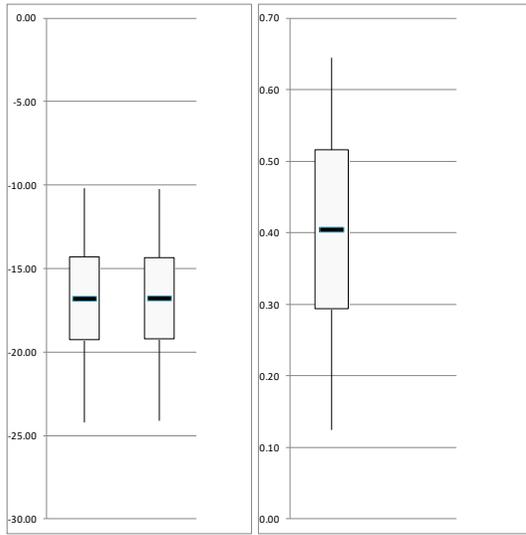
103



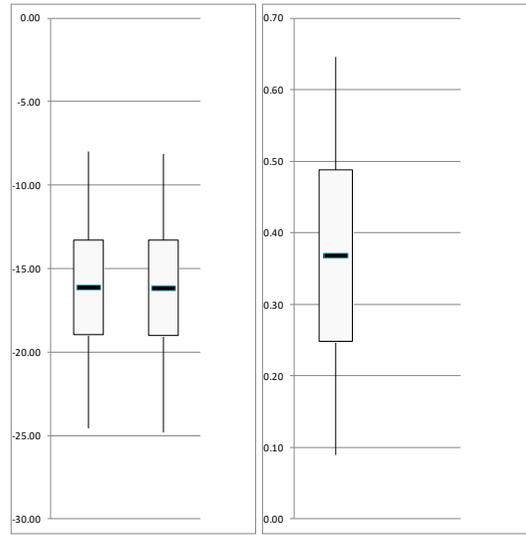
199



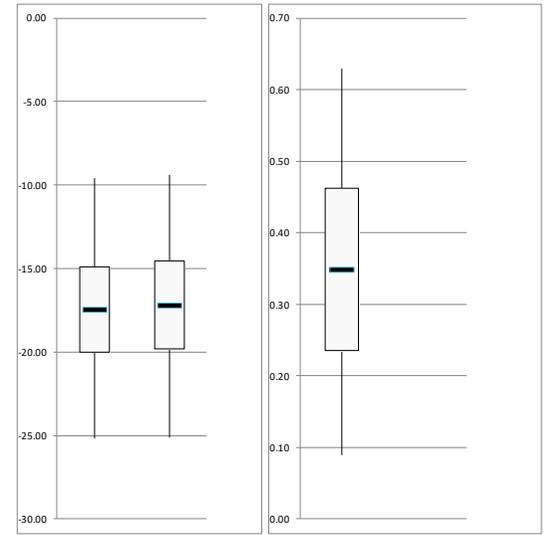
201



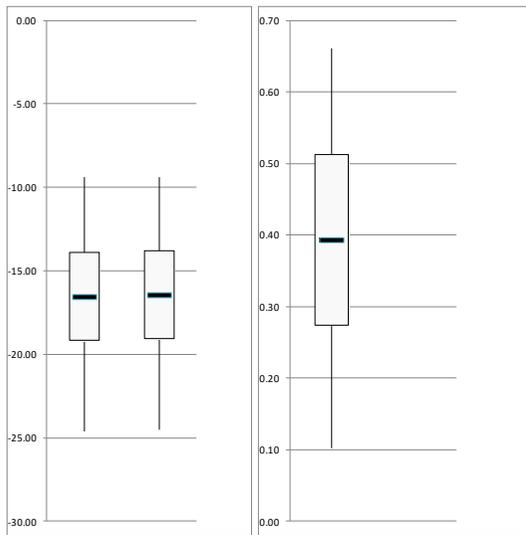
203



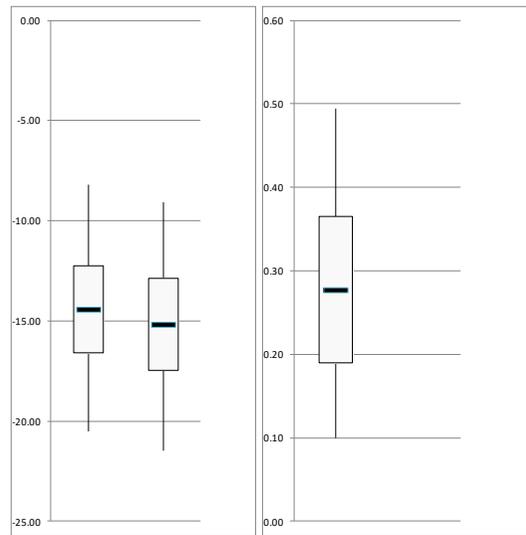
300



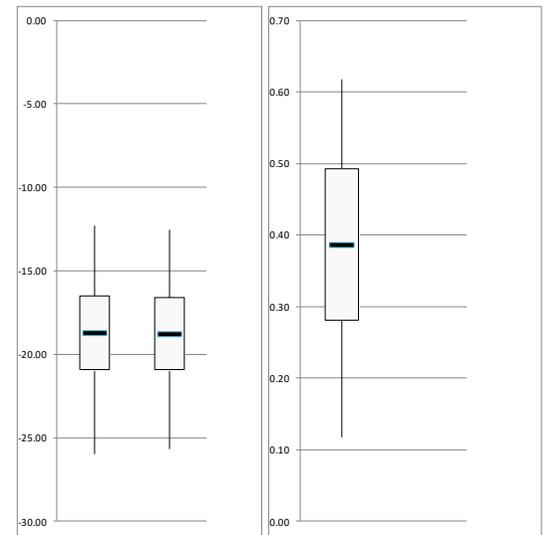
202



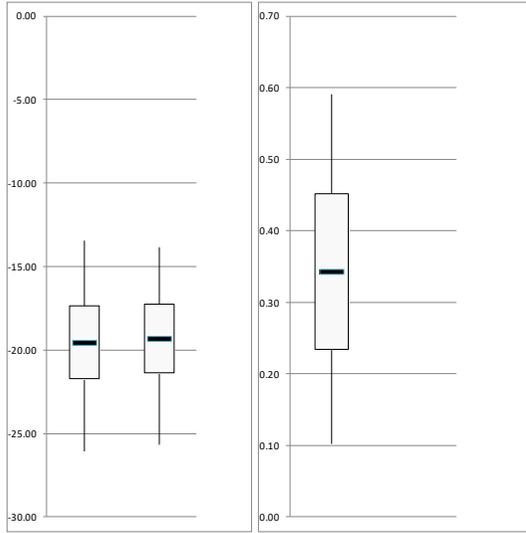
204



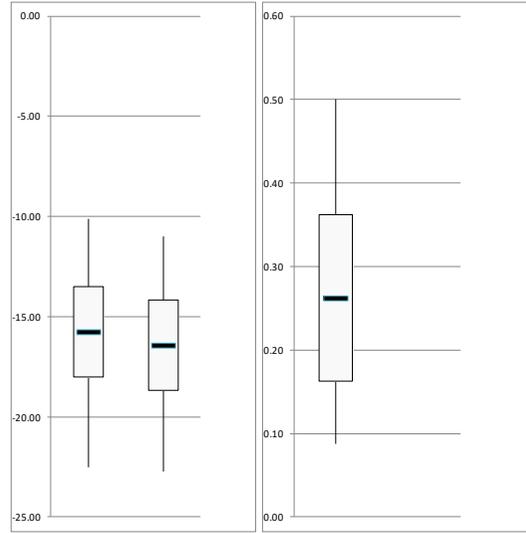
400



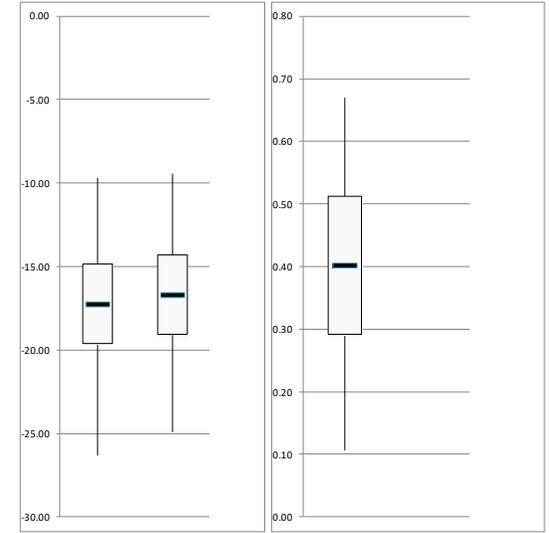
401



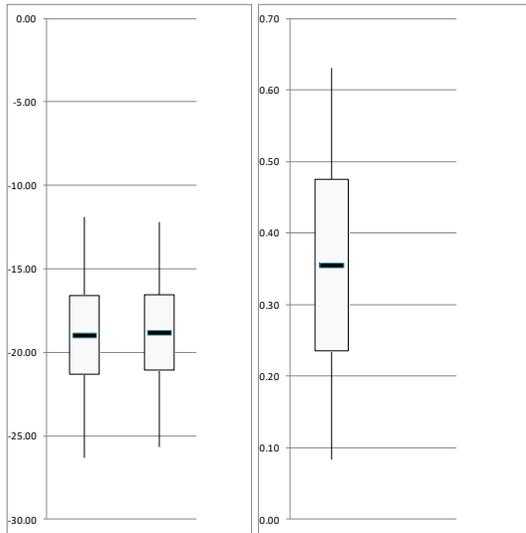
403



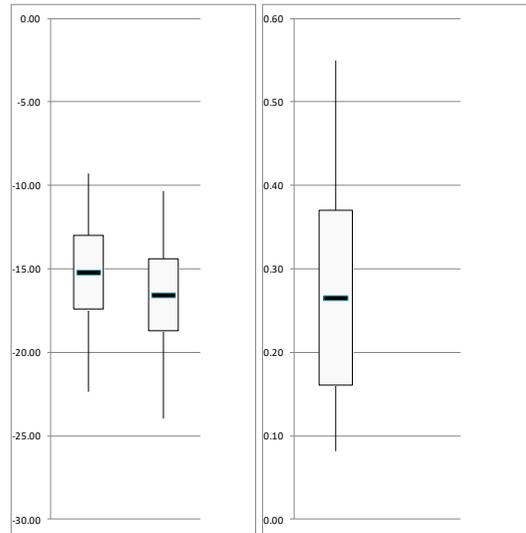
500



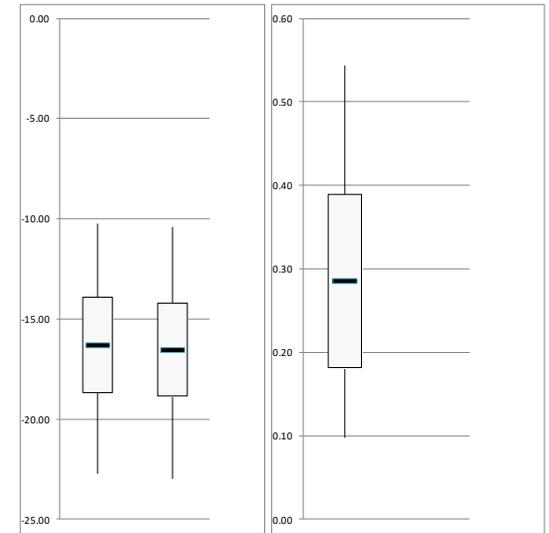
402



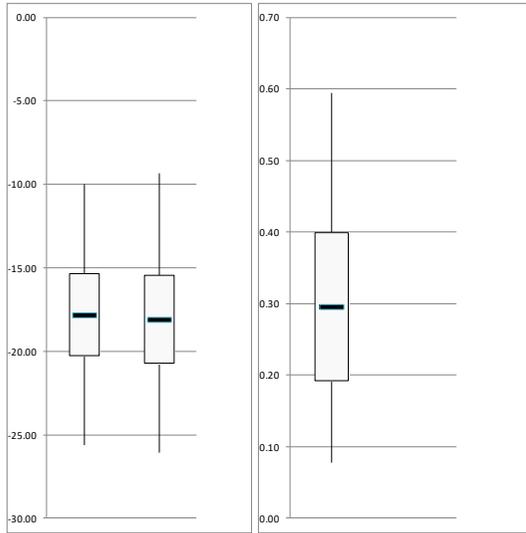
404



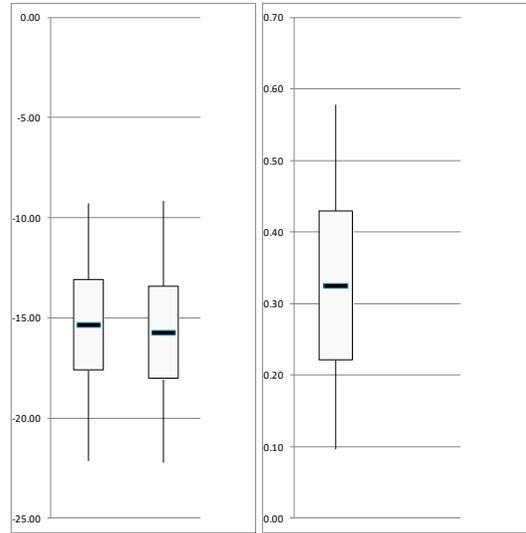
600



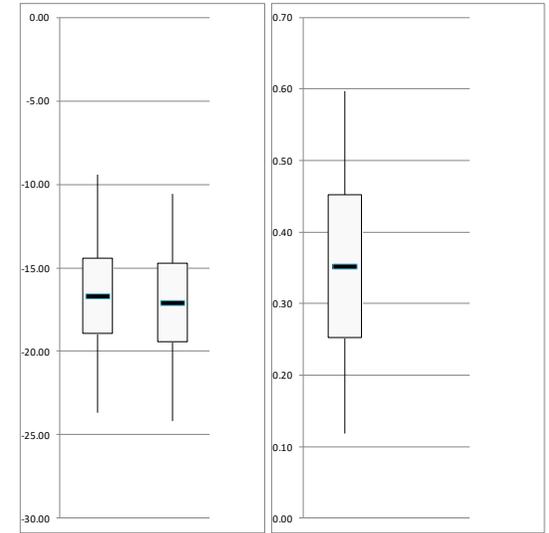
601



602



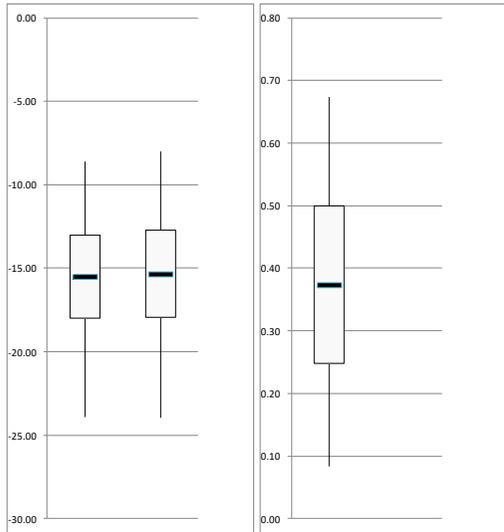
603



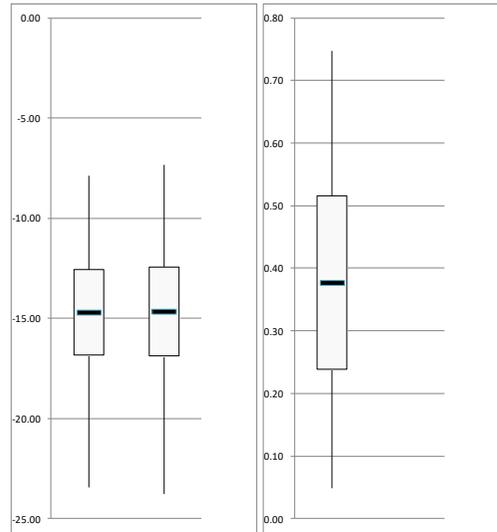
16.05.2019-28.05.2019

Приложение 5.2

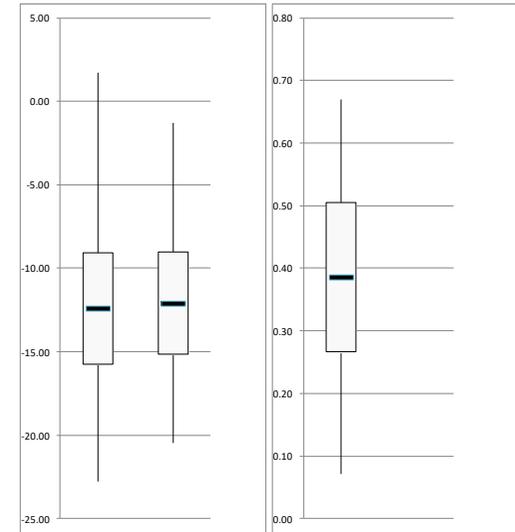
100



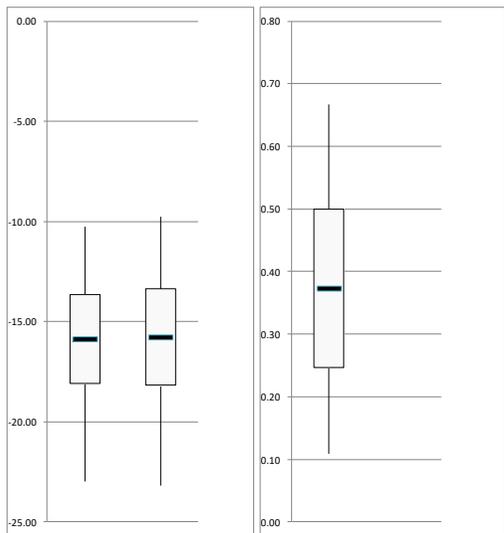
102



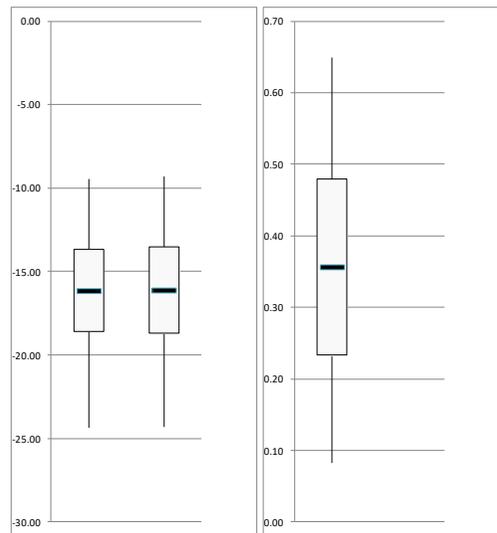
150



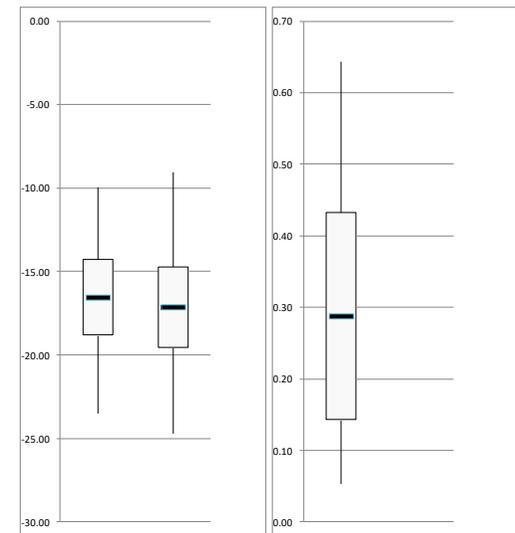
101



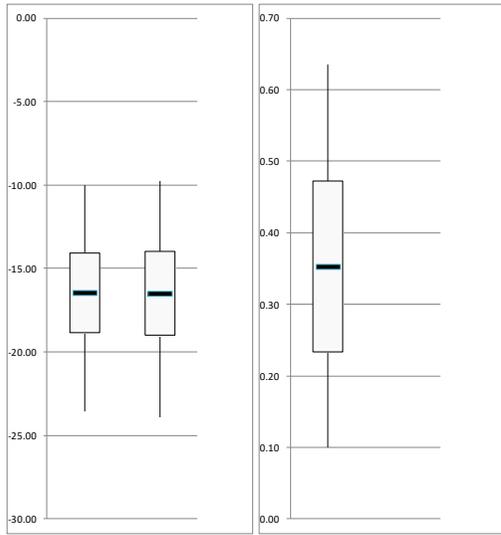
103



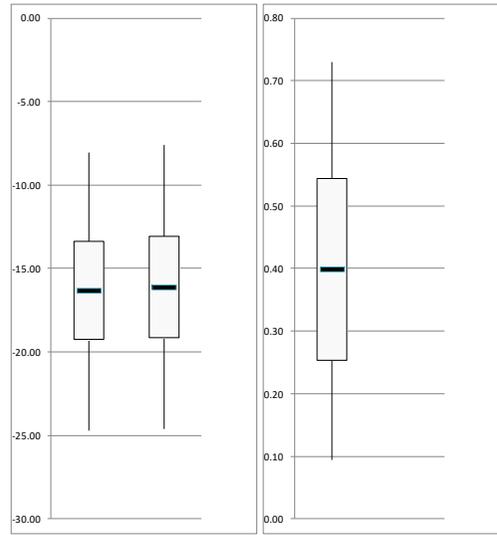
199



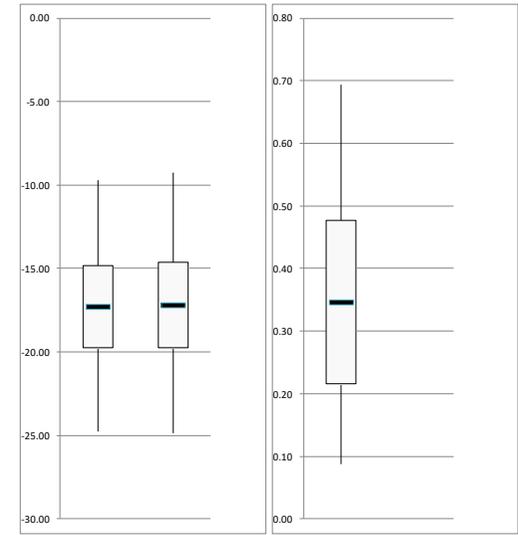
201



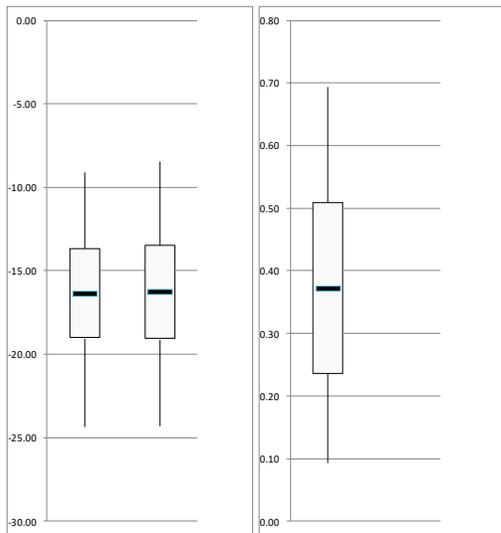
203



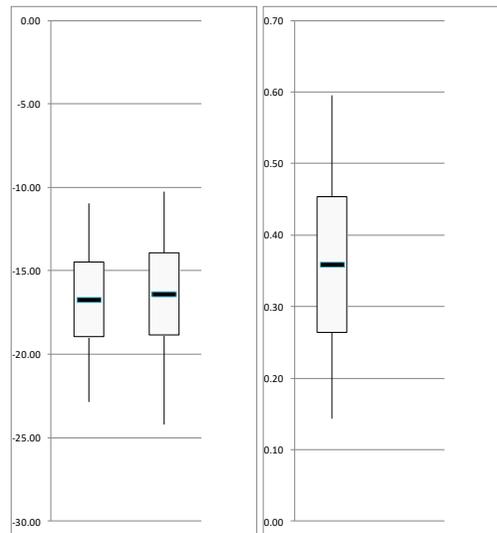
300



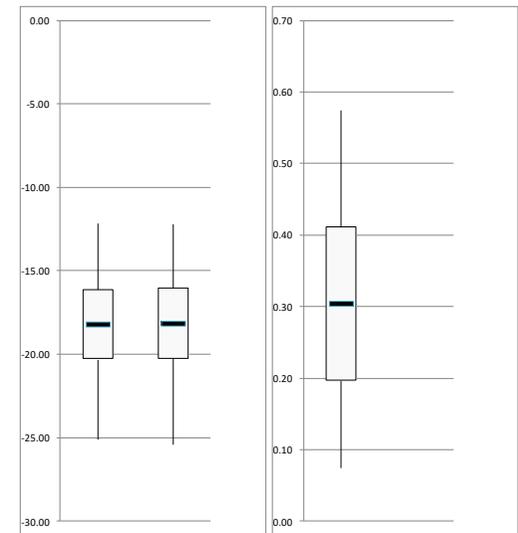
202



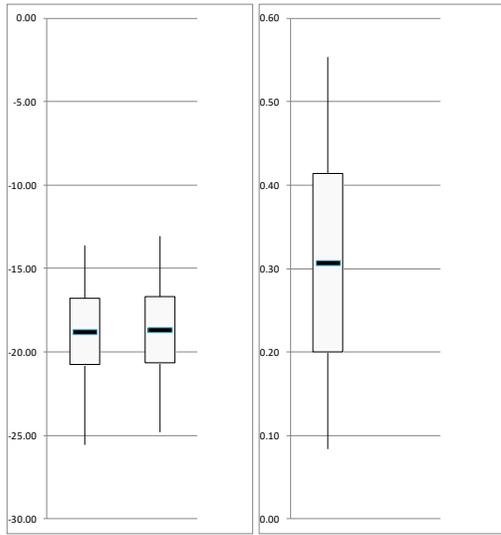
204



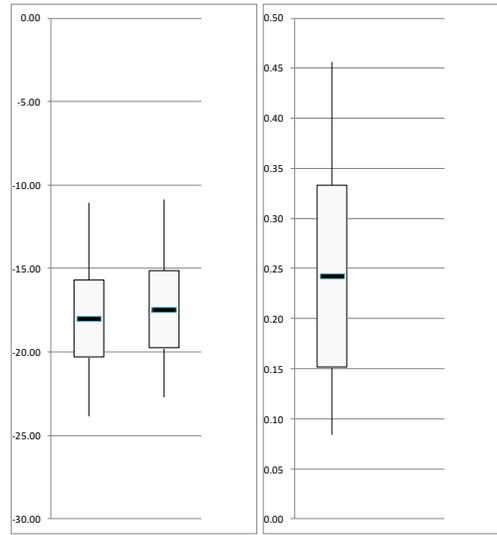
400



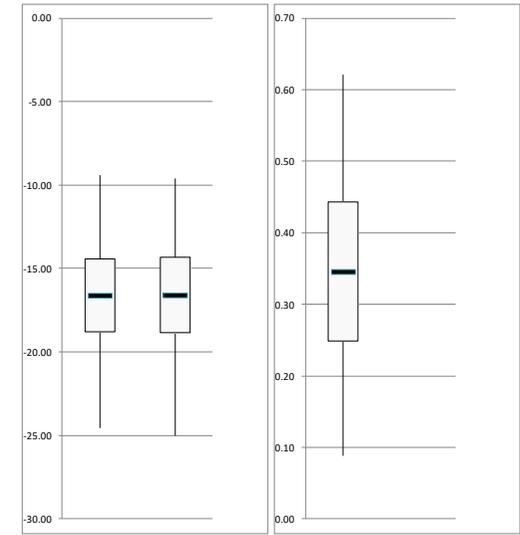
401



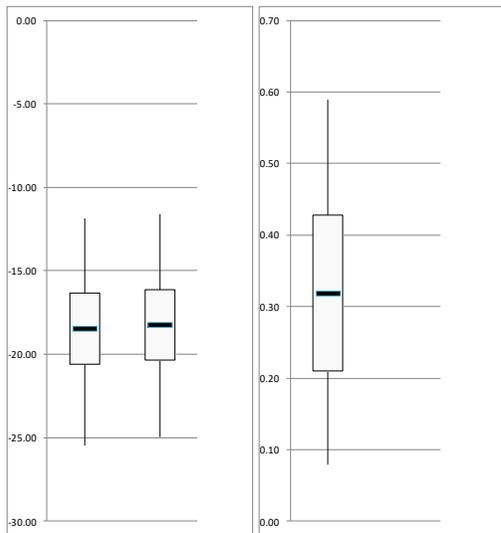
403



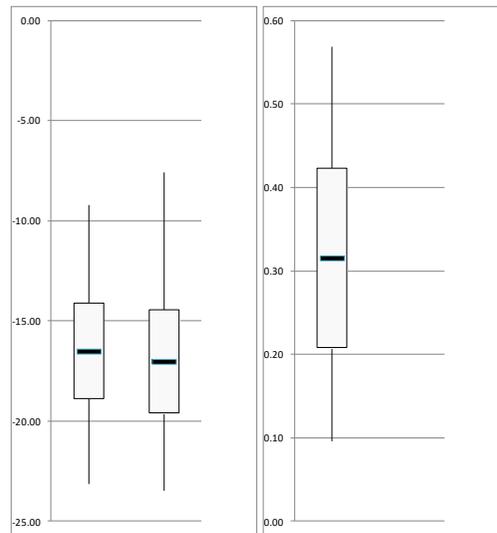
500



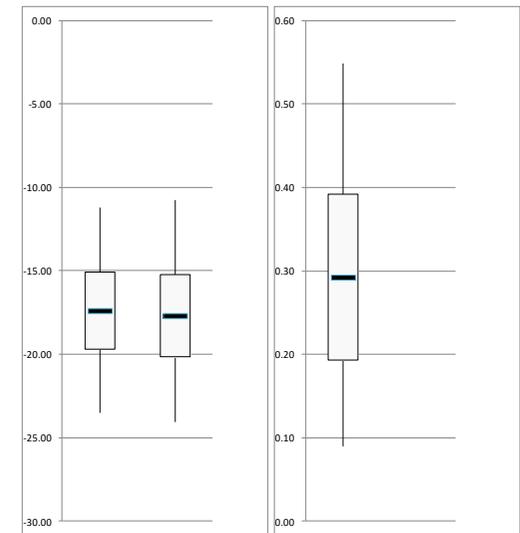
402



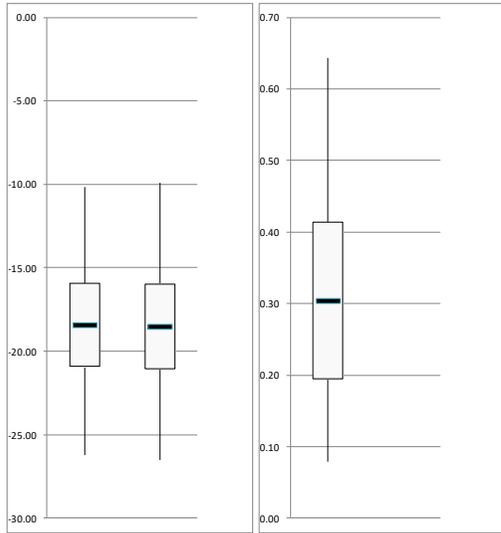
404



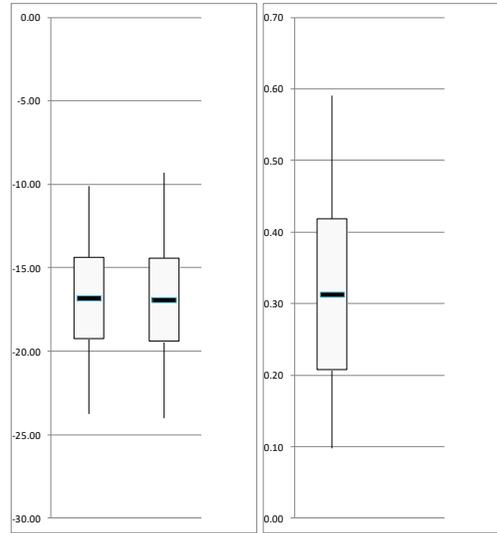
600



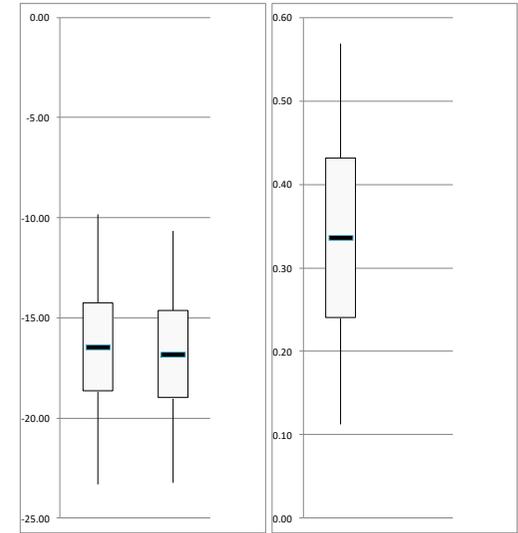
601



602



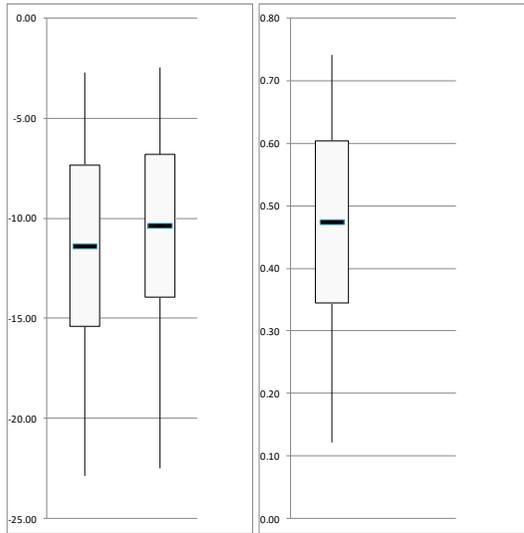
603



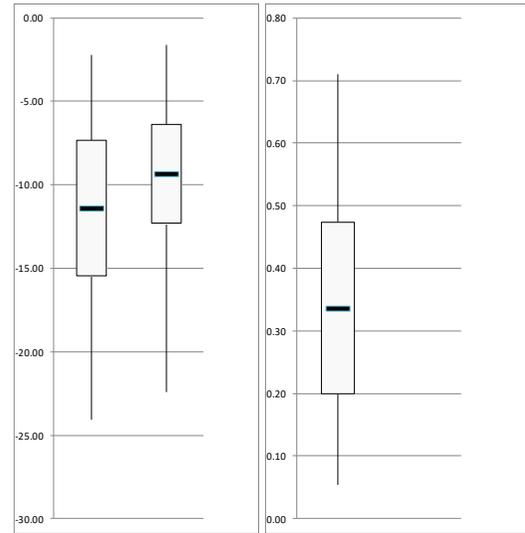
03.07.2019-15.07.2019

Приложение 5.3

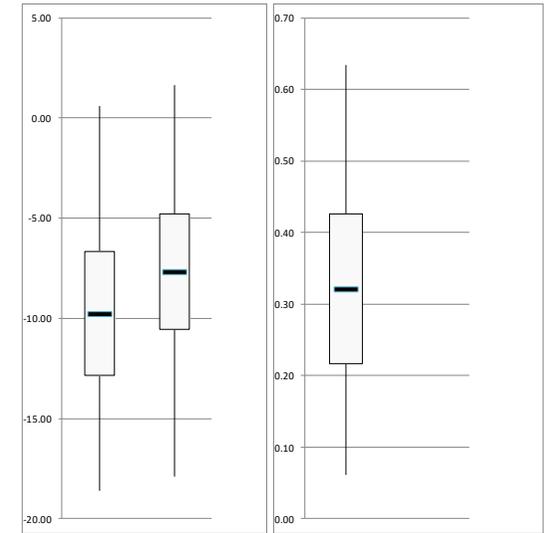
100



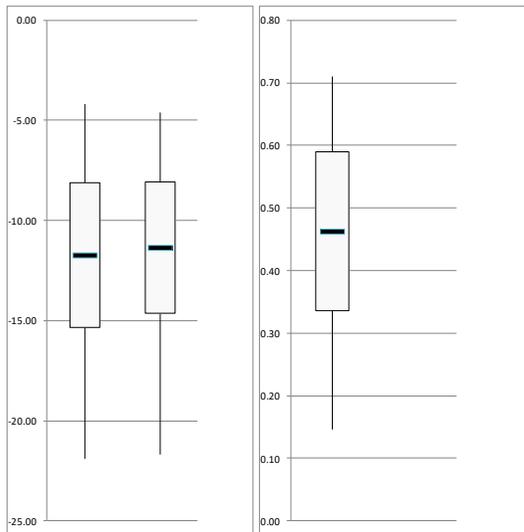
102



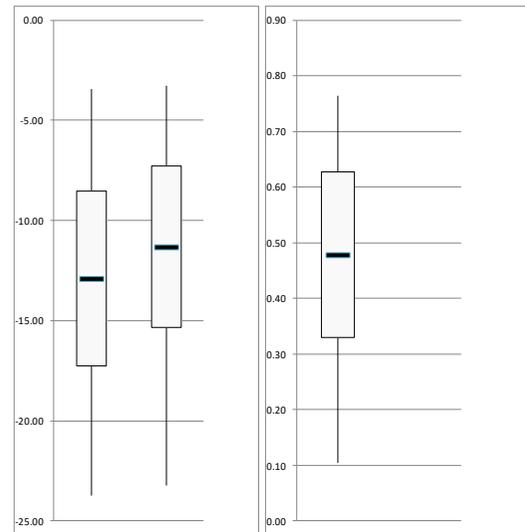
150



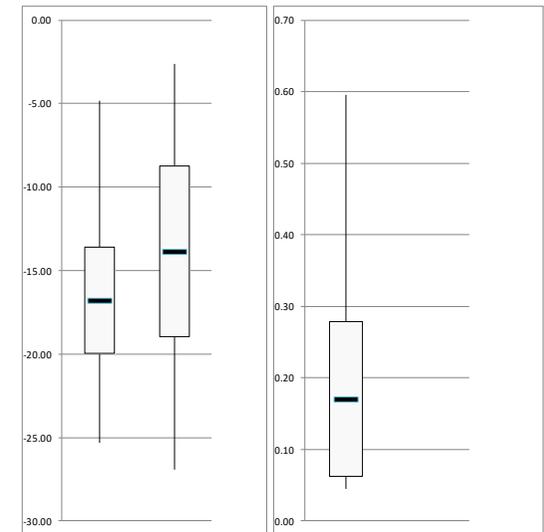
101



103

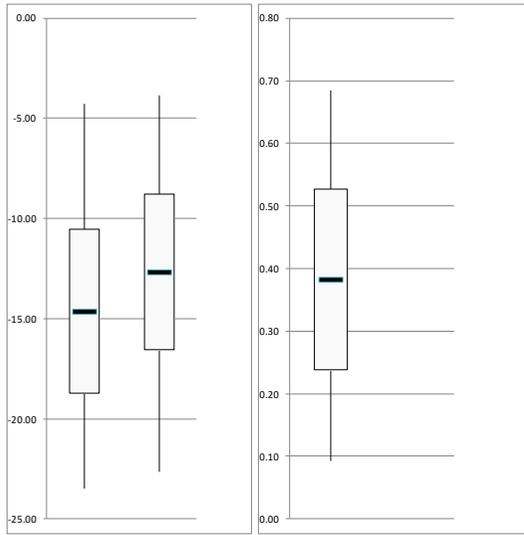


199

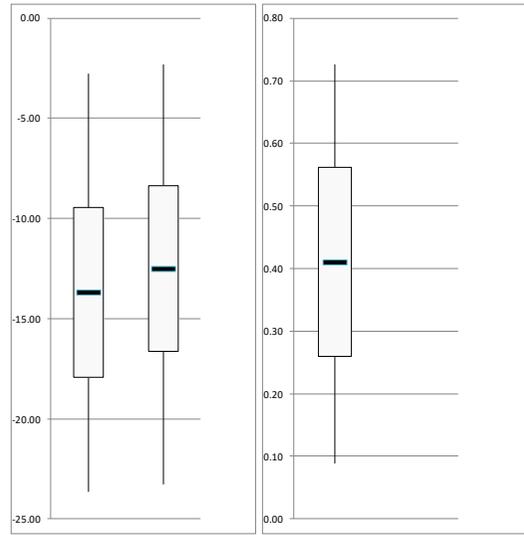


192

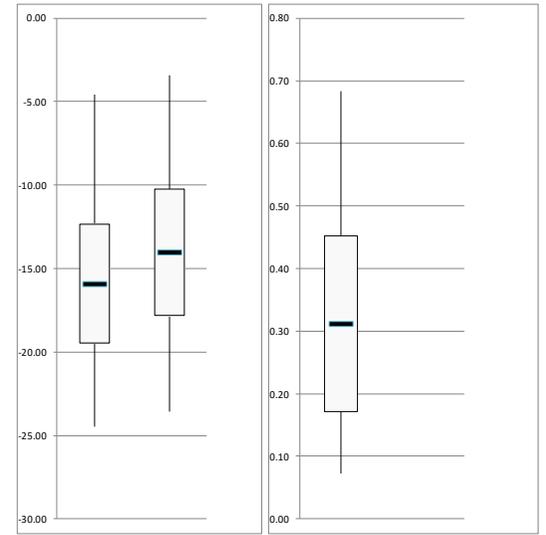
201



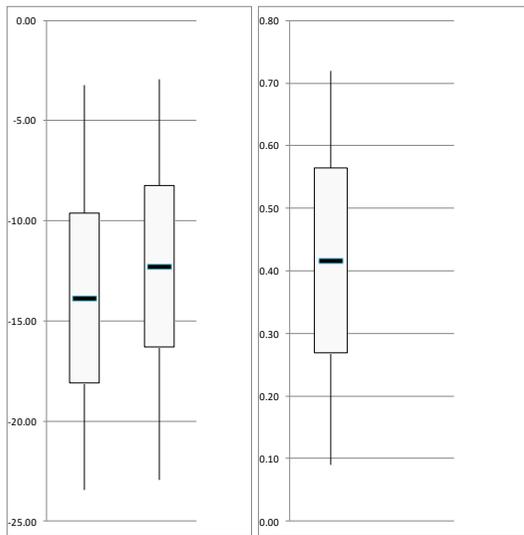
203



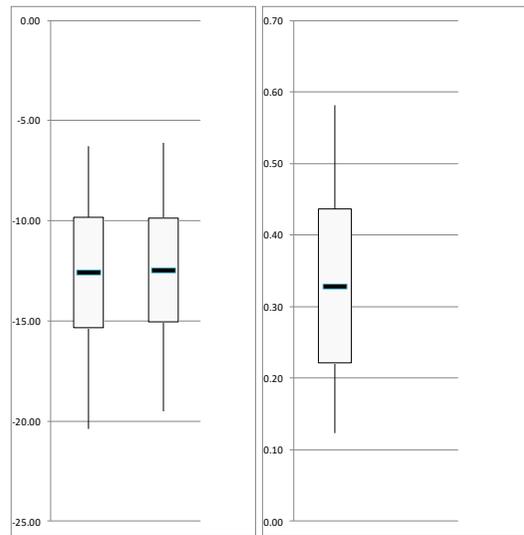
300



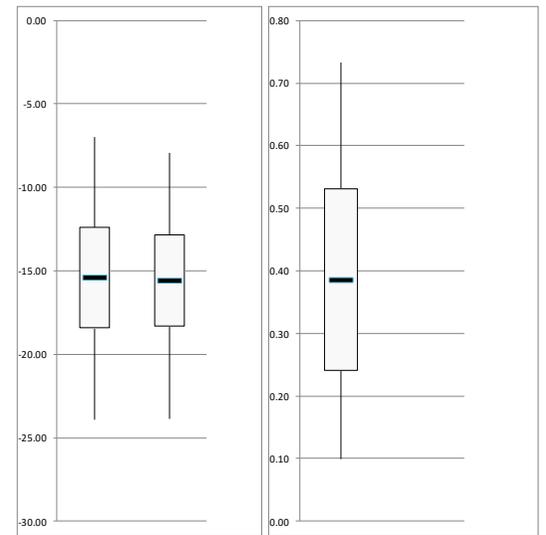
202



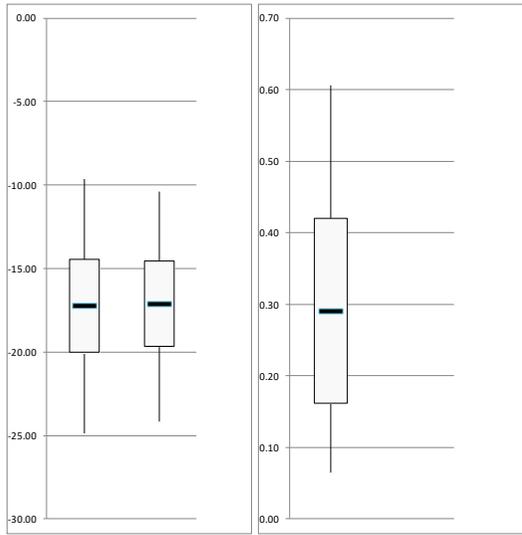
204



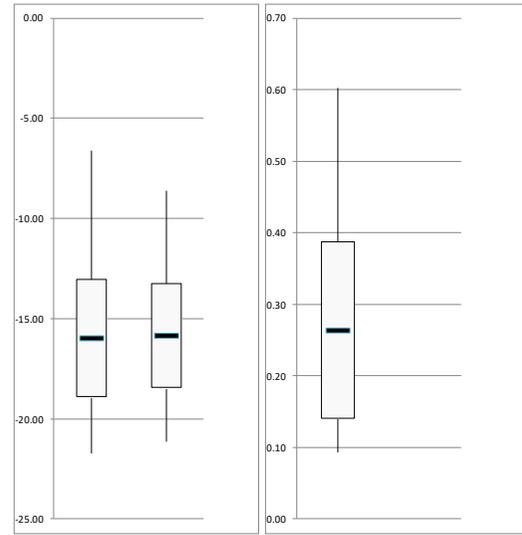
400



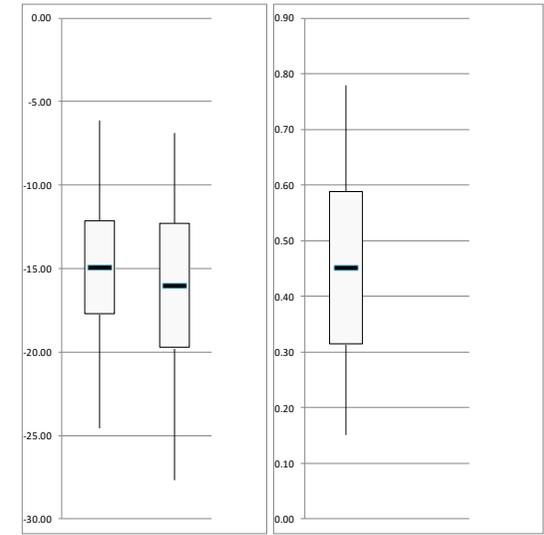
401



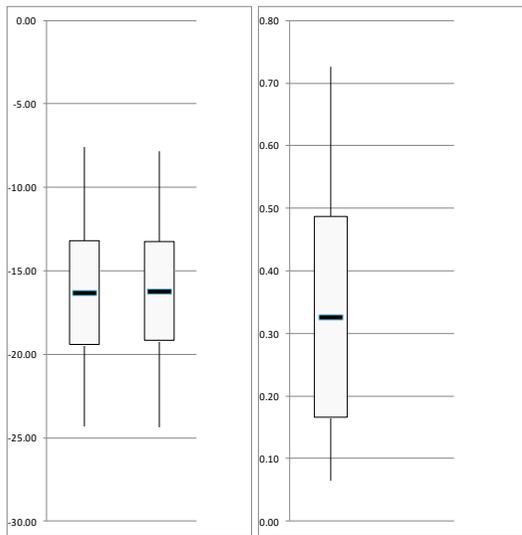
403



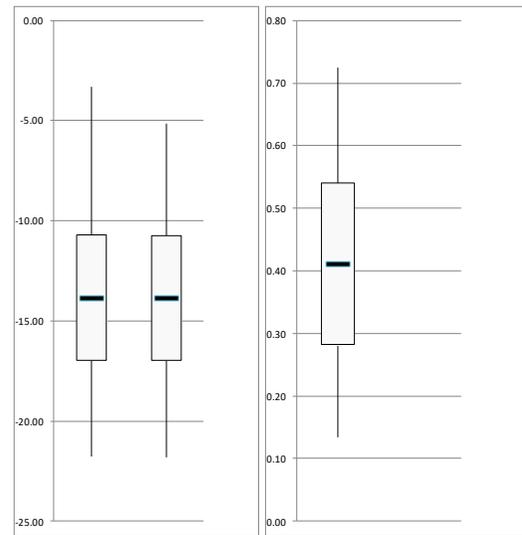
500



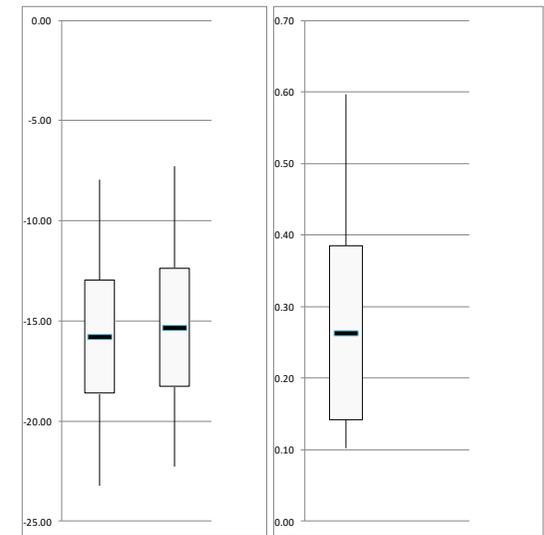
402



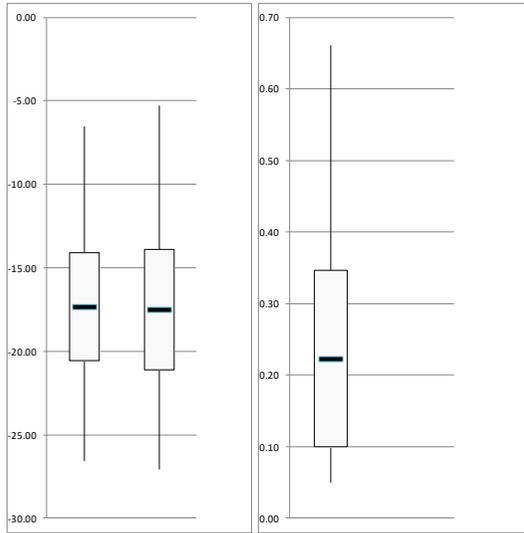
404



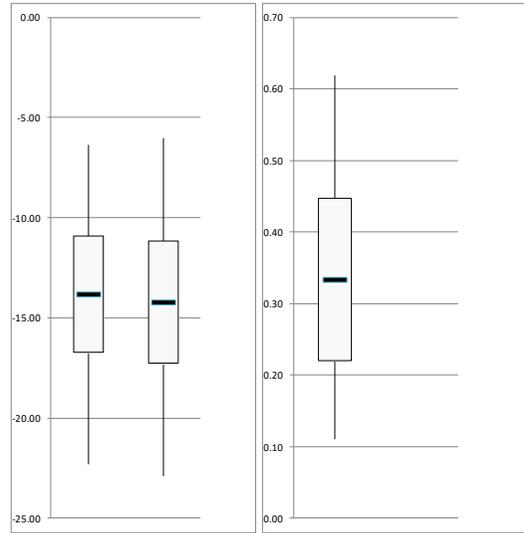
600



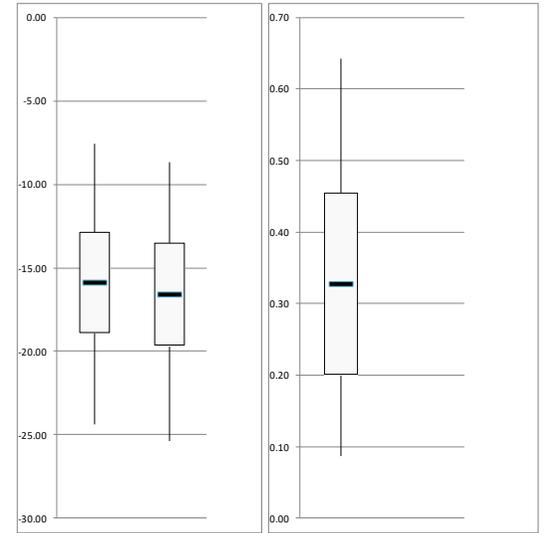
601



602



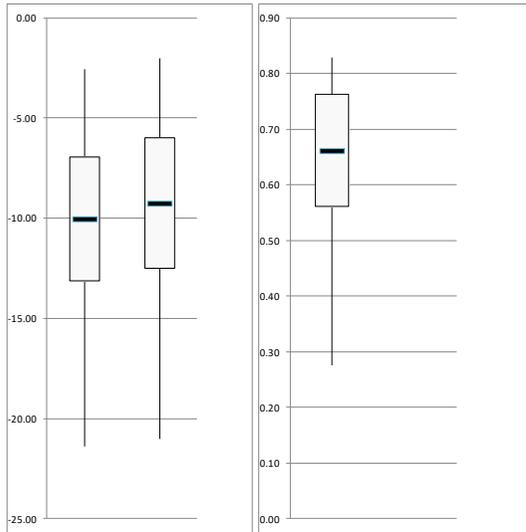
603



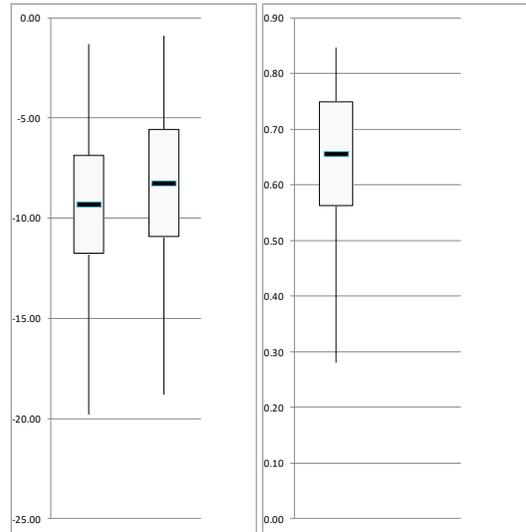
08.08.2019-20.08.2019

Приложение 5.4

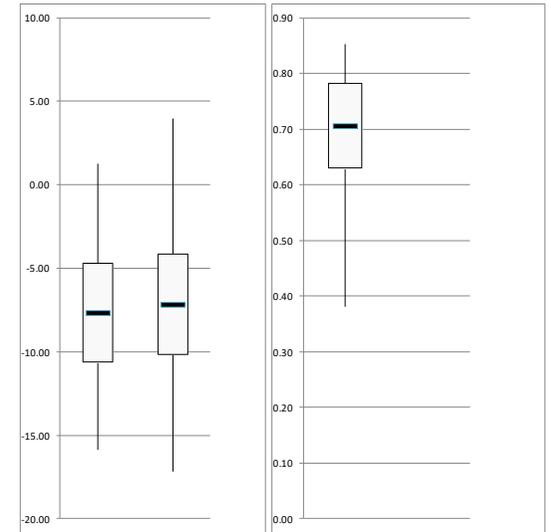
100



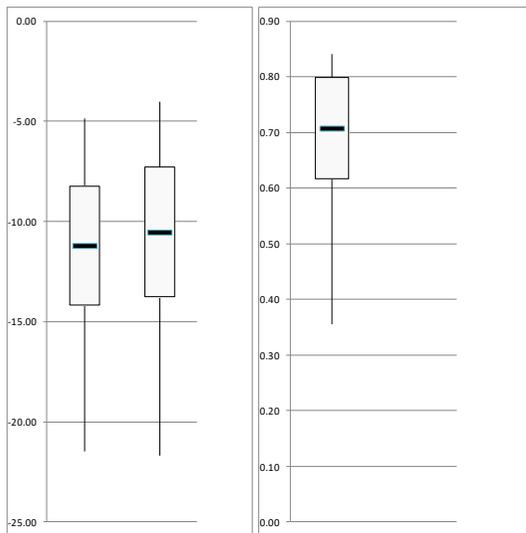
102



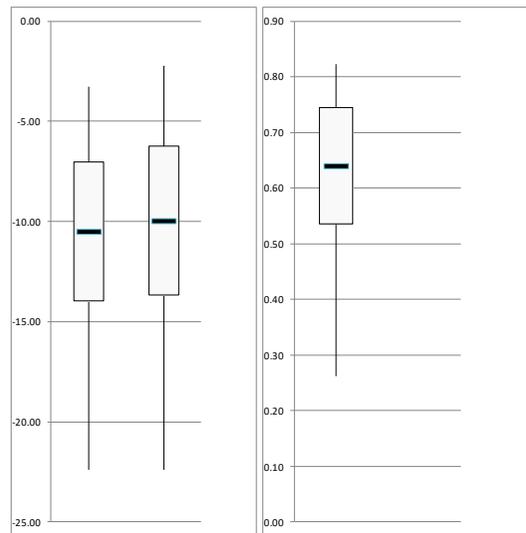
150



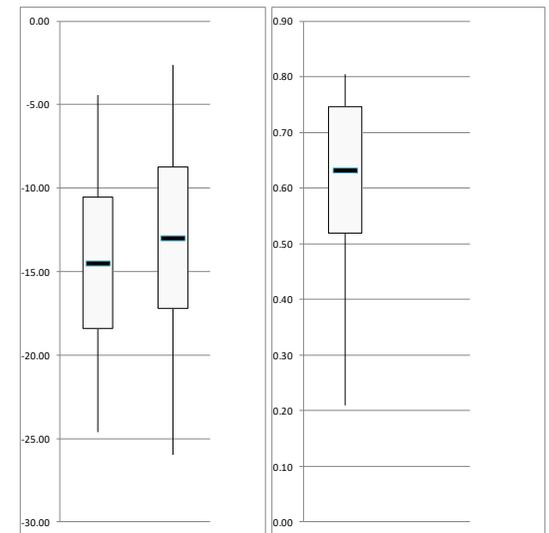
101



103

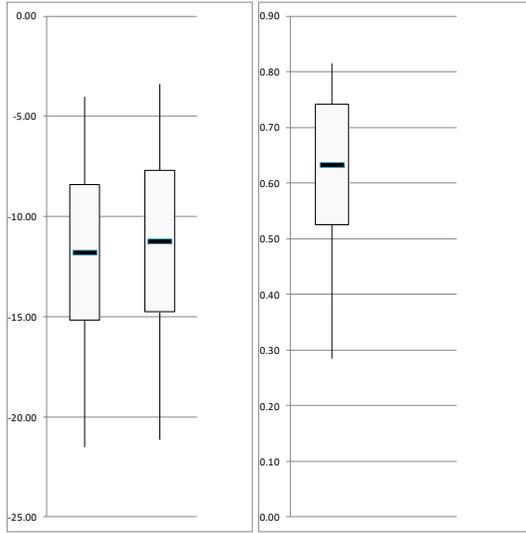


199

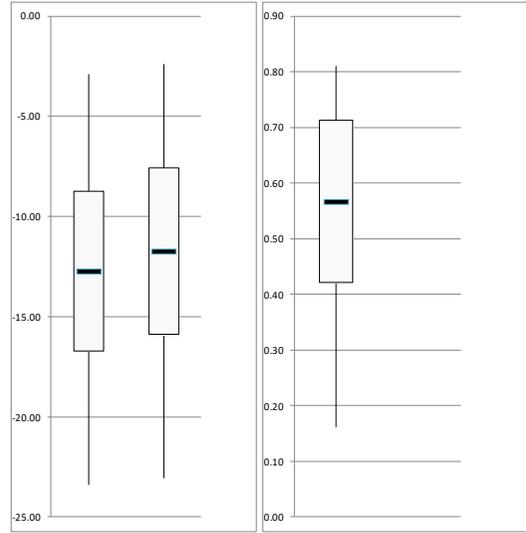


196

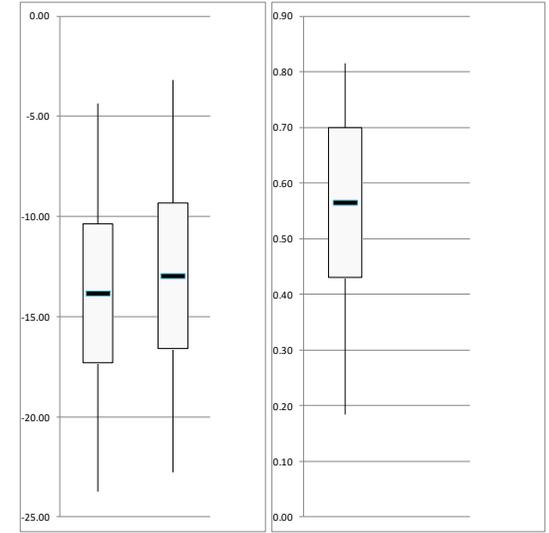
201



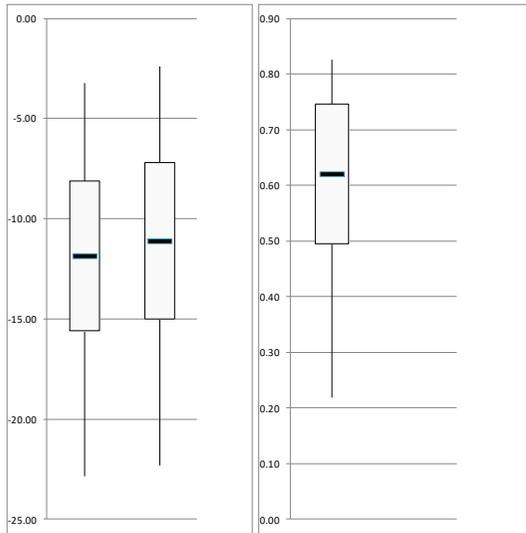
203



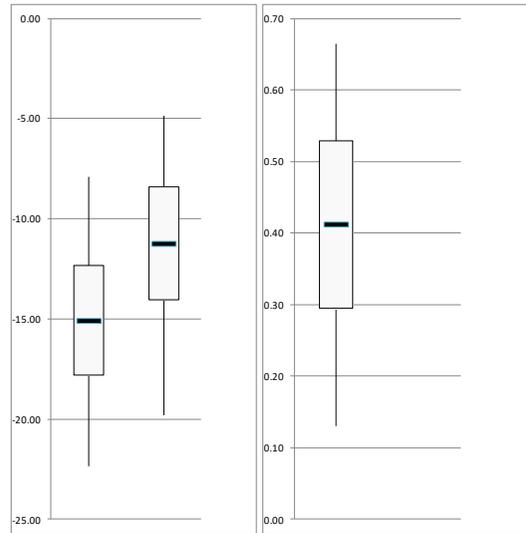
300



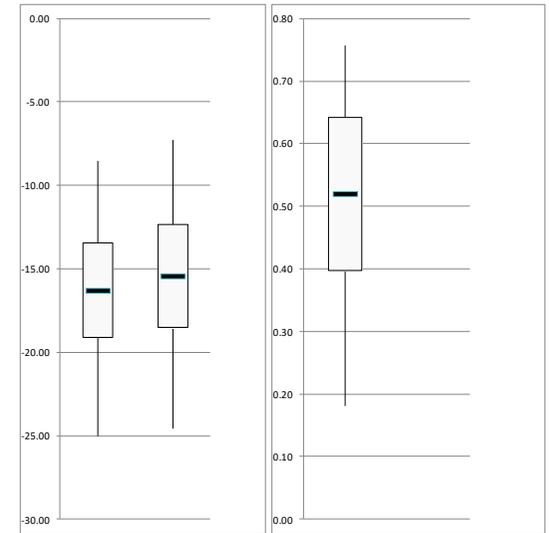
202



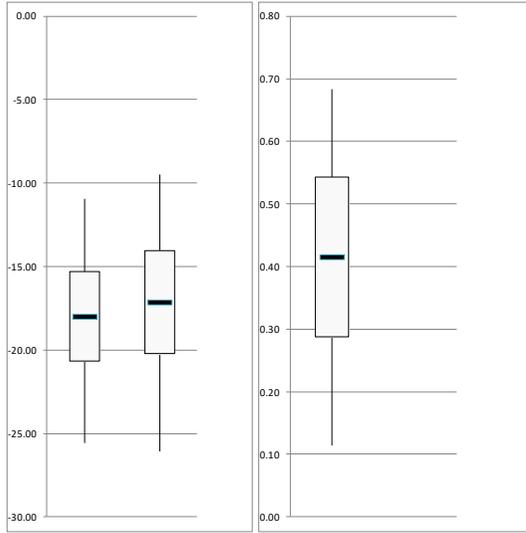
204



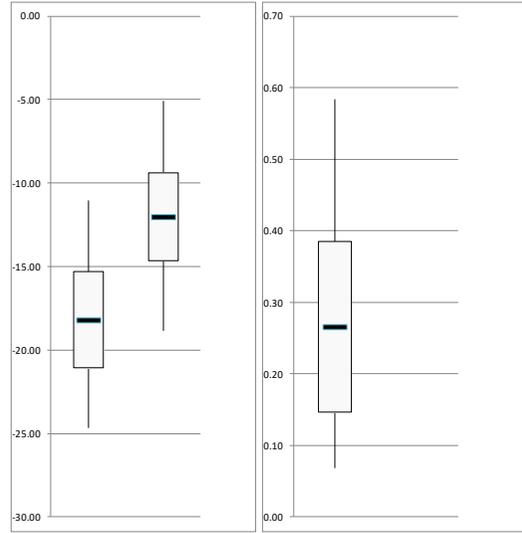
400



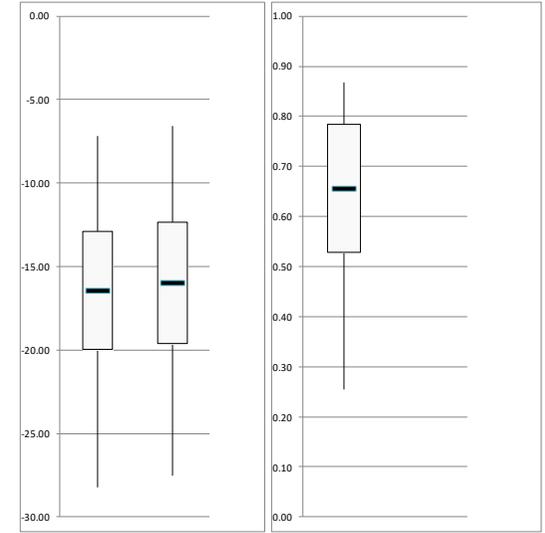
401



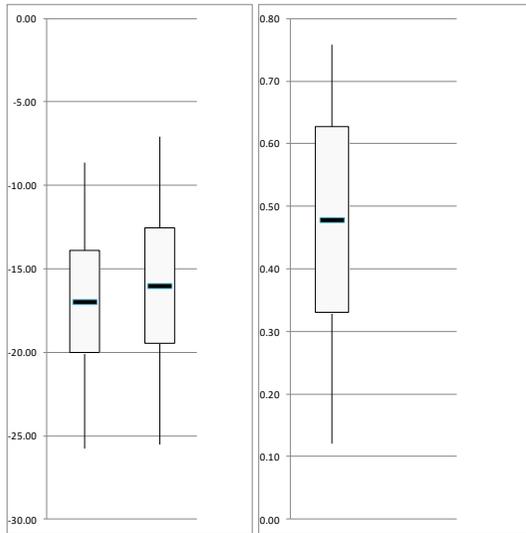
403



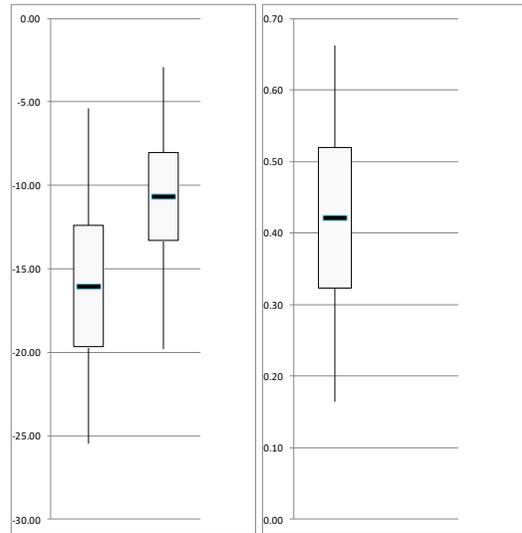
500



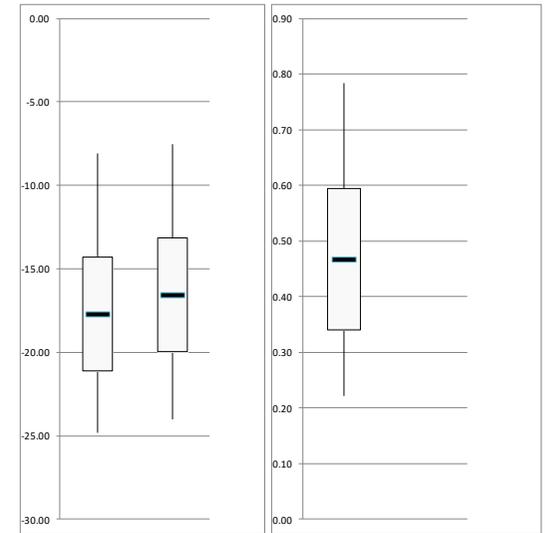
402



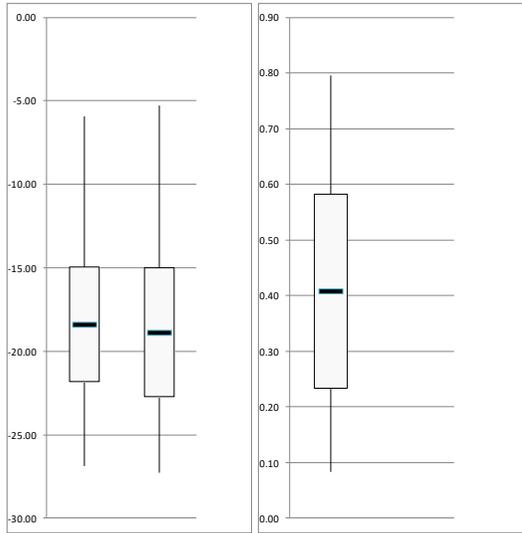
404



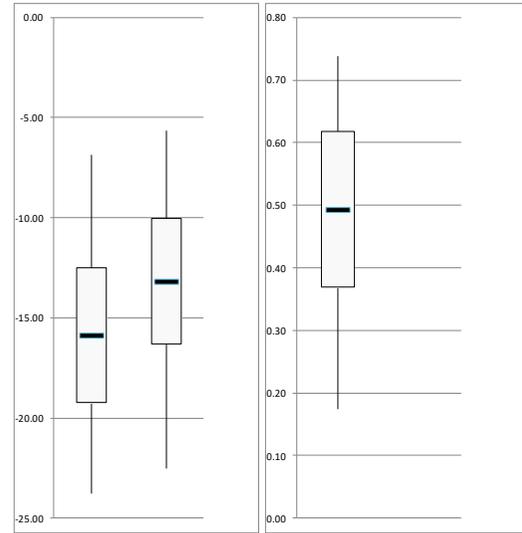
600



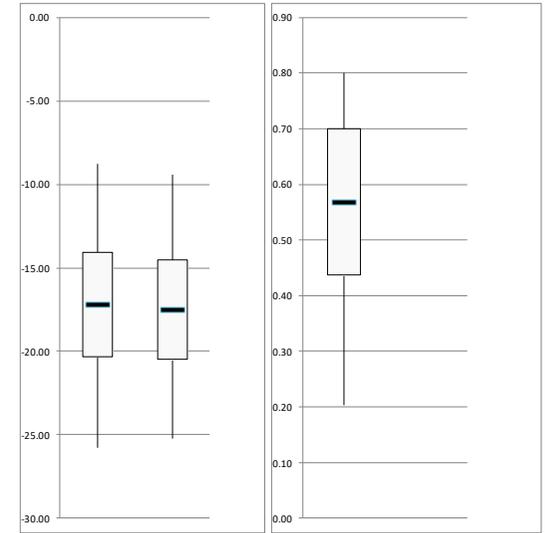
601



602



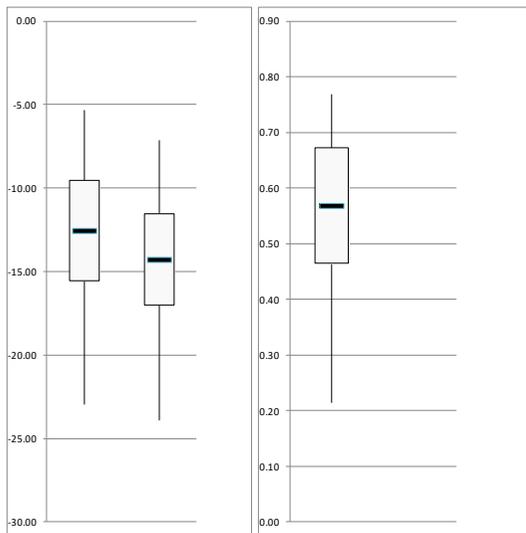
603



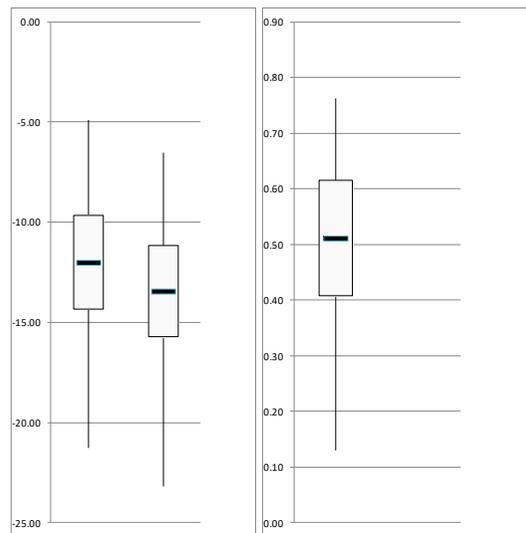
100

25.09.2019-07.10.2019

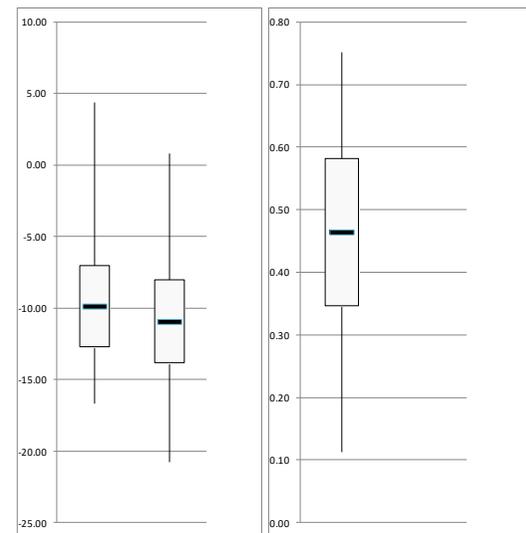
Приложение 5.5



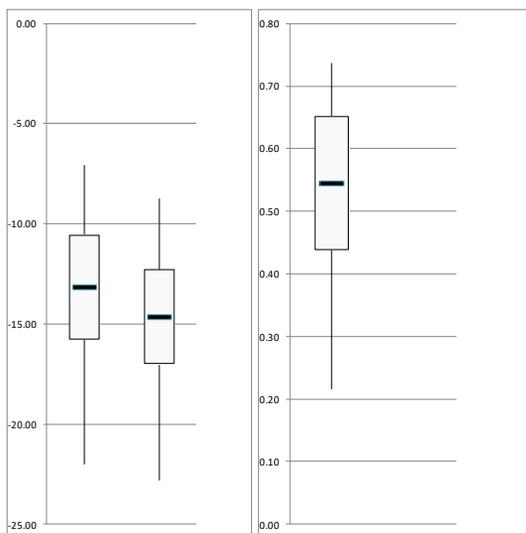
102



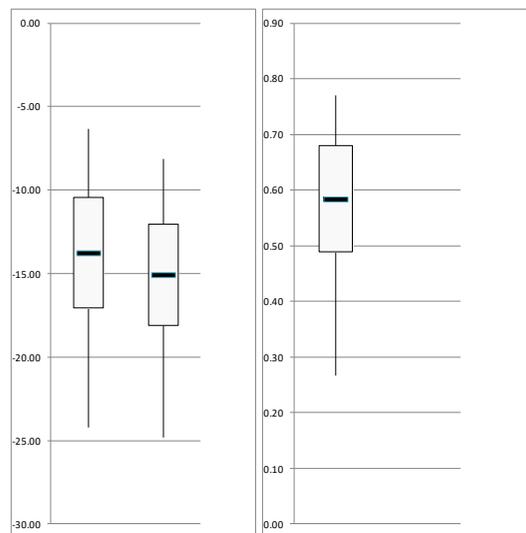
150



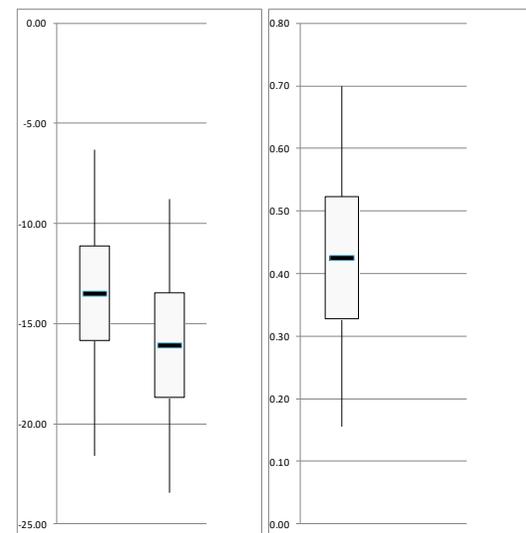
101



103

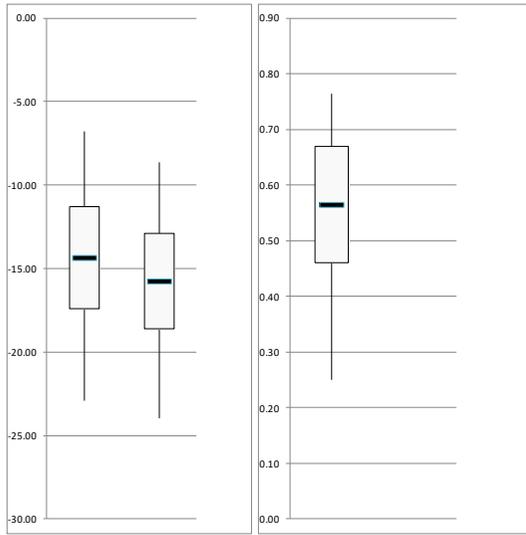


199

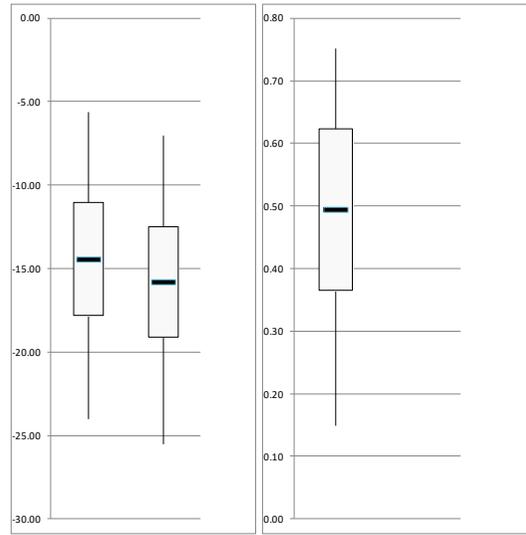


200

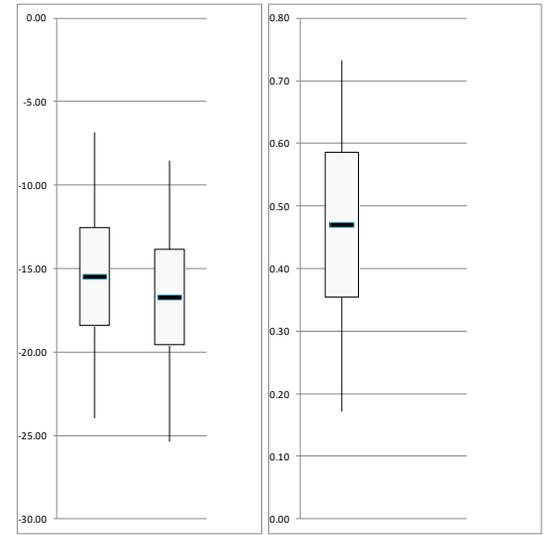
201



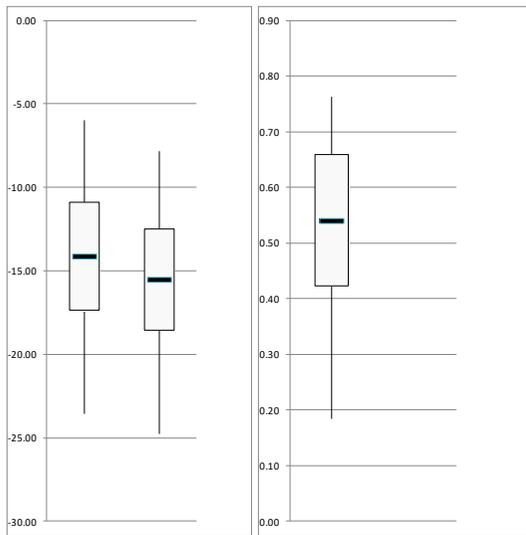
203



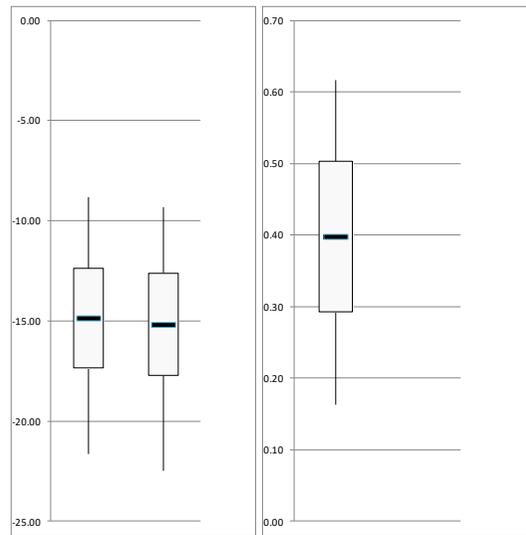
300



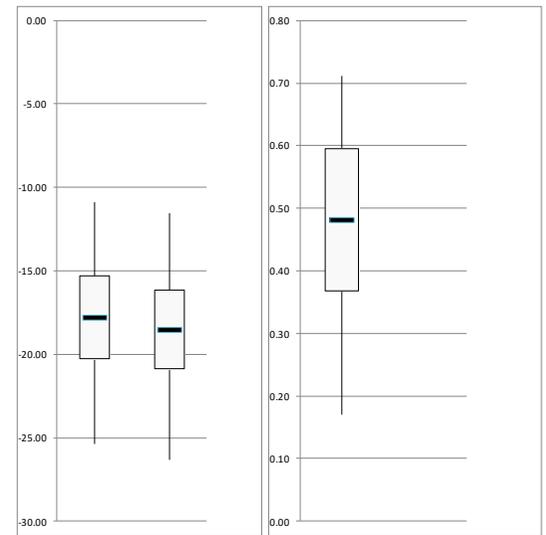
202



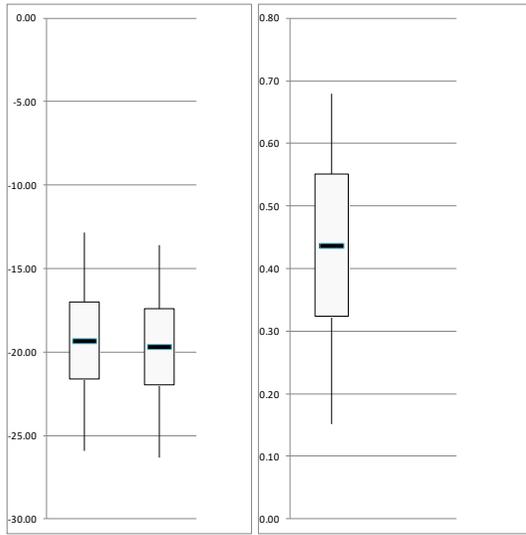
204



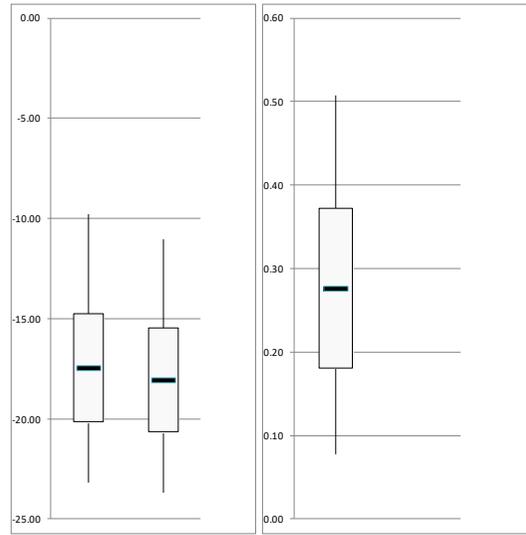
400



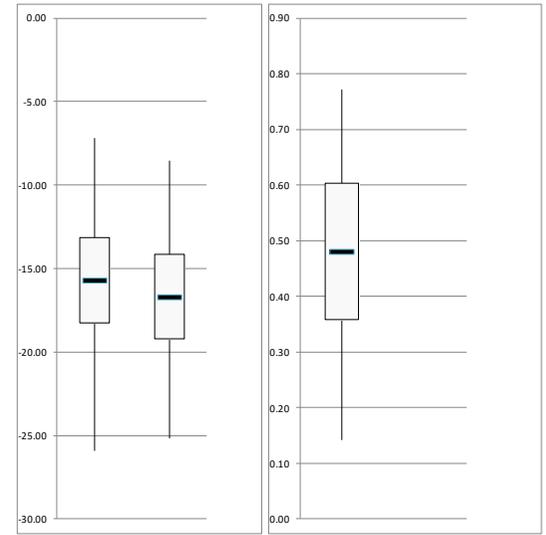
401



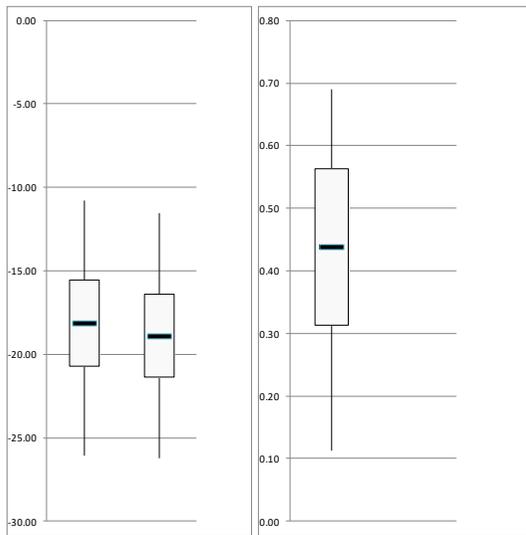
403



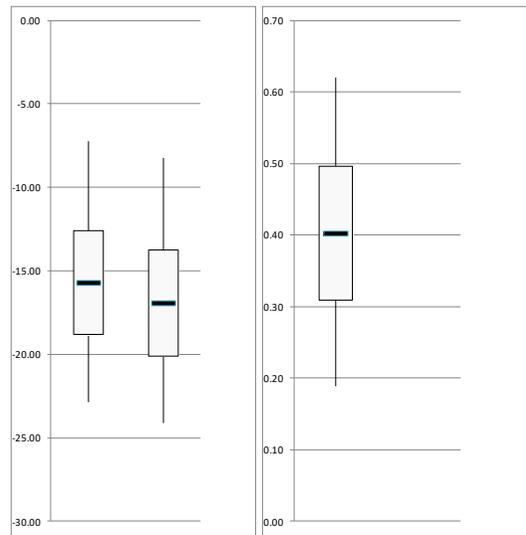
500



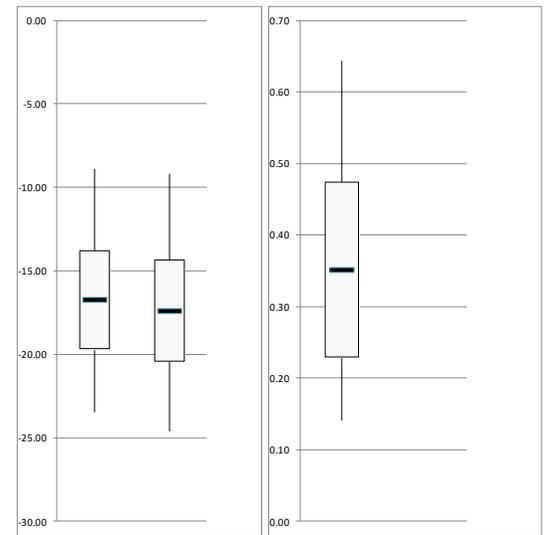
402



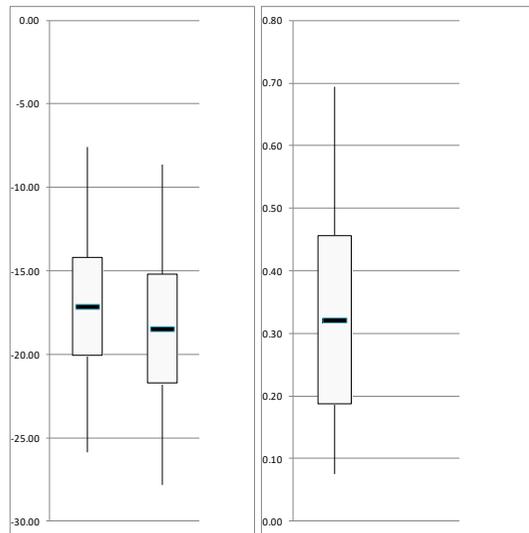
404



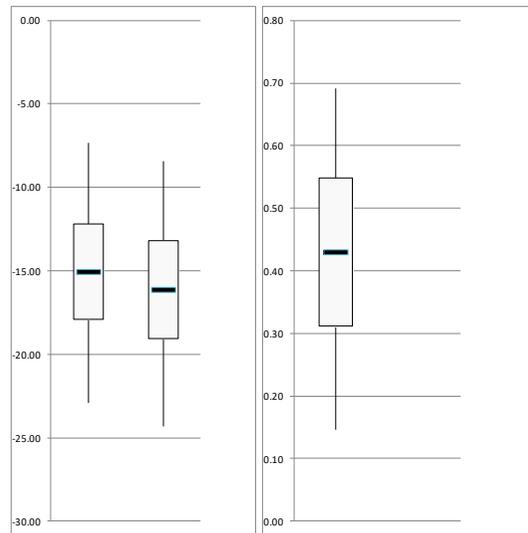
600



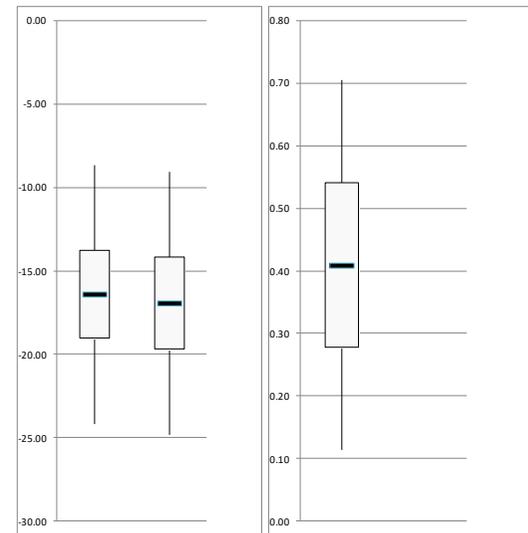
601



602



603



Приложение 6. Основные метеопараметры (по ст. Мильково), характеризующие состояние местности в моменты съемки

